

LE DESSALEMENT DE L'EAU : UN OUTIL D'ADAPTATION POTENTIEL DANS UNE OPTIQUE DE
DÉVELOPPEMENT DURABLE

Par Sophie Gonthier

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de François Lafortune

MAITRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Janvier 2020

SOMMAIRE

Mots-clés : technologies de dessalement, changements climatiques, gaz à effet de serre, crise de l'eau, stress hydrique, adaptation, ressources en eau douce, développement durable.

L'objectif principal de cet essai est d'analyser le potentiel du dessalement de l'eau comme outil d'adaptation destiné aux populations vulnérables face aux changements climatiques affectant les ressources en eau douce, et ce, dans une perspective de développement durable. Les ressources en eau douce subissent des pressions en raison de l'utilisation non durable des ressources et de l'augmentation constante de la demande. En plus, les changements climatiques créent une pression supplémentaire en ayant un impact négatif sur la quantité, la qualité et l'accessibilité des réserves en eau douce qui va graduellement s'intensifier avec l'augmentation du réchauffement planétaire. Cet essai a donc pour but d'étudier la possibilité d'outiller les populations vulnérables face aux changements climatiques affectant les ressources en eau douce afin d'augmenter leur résilience face aux variations climatiques présentes et futures affectant la disponibilité des ressources en eau douce. La solution mise de l'avant dans le cadre de cette analyse est le dessalement de l'eau.

L'étude des enjeux entourant les ressources en eau et de l'interrelation entre les changements climatiques et le stress hydrique permet de cibler les populations les plus vulnérables face aux changements climatiques qui affectent les ressources en eau douce, soit 74 pays répartis sur tous les continents. Quant à elle, l'analyse des technologies de dessalement met en lumière leur capacité à agir comme outil d'adaptation en répondant en tout ou en partie à la problématique de la raréfaction des ressources en eau douce. Aussi, l'analyse des enjeux entourant le dessalement de l'eau permet de cibler les risques environnementaux et sociaux associés au déploiement de ces technologies comme outil d'adaptation et de déterminer les stratégies de gestion potentielles pour encadrer leur utilisation qui permettent de tendre vers la durabilité de la solution. Les principaux enjeux portent sur l'émission de gaz à effet de serre, la destruction des écosystèmes aquatiques et terrestres, la santé de la population, l'acceptabilité sociale, le coût économique et la création d'emplois locaux.

Des recommandations destinées à la communauté internationale ainsi qu'aux acteurs publics et privés nationaux ont été émises quant à la gestion durable des enjeux. Aussi, des recommandations ont été émises afin de rendre possible l'intégration du dessalement de l'eau pour l'ensemble des populations vulnérables, incluant les populations ayant un faible pouvoir économique. À cet effet, il est grandement recommandé de miser sur la coopération internationale et d'utiliser une partie des fonds destinés à l'adaptation aux changements climatiques et à la gestion de la crise de l'eau des différentes organisations pour l'intégration du dessalement de l'eau dans les méthodes de gestion. Bref, le dessalement de l'eau permet de produire de l'eau douce et d'ainsi augmenter la résilience des populations vulnérables face aux changements climatiques affectant les ressources en eau douce. Toutefois, le caractère durable de cet outil est dépendant d'une gestion durable des enjeux et des risques reliés au dessalement de l'eau.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier mon directeur d'essai, M. François Lafortune, pour son ouverture, sa vitalité d'esprit et sa curiosité. Il a su guider ma rédaction et orienter mes réflexions par le biais de ses commentaires constructifs et de ses suggestions pertinentes. Je tiens aussi à le remercier pour son positivisme et pour la confiance qu'il m'a accordée dans la rédaction de cet essai.

Je remercie également ma famille qui m'a offert son soutien et ses encouragements tout au long de cette aventure. Une pensée spéciale est accordée à ma mère, Josée, et à ma grand-mère, Suzanne, pour leur dévouement ainsi qu'à mon grand-père, André.

Finalement, un grand merci à mes ami(e)s qui ont su m'écouter et me motiver dans les moments de doute. Un clin d'œil à Estelle qui a su enrichir et influencer mes réflexions durant nos multiples discussions.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET CAPACITÉ D'ADAPTATION	3
1.1 Contexte des changements climatiques	3
1.2 Impacts du réchauffement planétaire	6
1.3 Lutte contre les changements climatiques	9
1.4 Capacité d'adaptation, résilience et vulnérabilité	10
2 L'EAU DOUCE : ÉLÉMENT ESSENTIEL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE	13
2.1 Droit international de l'homme à l'eau	13
2.2 L'eau sur Terre	14
2.2.1 Le cycle de l'eau	14
2.2.2 Ressources mondiales en eau	16
2.2.3 Répartition des ressources en eau douce	19
2.3 Utilisation des ressources en eau douce dans le monde	20
2.3.1 Agriculture	22
2.3.2 Consommation humaine	23
2.3.3 Procédés industriels	23
2.4 La crise de l'eau : quand la demande est plus grande que la disponibilité	24
2.4.1 Définition de stress hydrique	24
2.4.2 État actuel du stress hydrique	25
3 CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET RESSOURCES EN EAU DOUCE	28
3.1 Impacts des changements climatiques sur le cycle de l'eau	28
3.1.1 Précipitation et évapotranspiration	30
3.1.2 La cryosphère	31
3.1.3 Ruissellement et débit fluvial	32
3.2 Impacts des variations du cycle de l'eau sur les ressources en eau douce	33
3.2.1 Corrélation entre les changements climatiques et la crise de l'eau	33
3.2.2 Demande en eau douce	35
3.2.3 Qualité d'eau douce disponible	36
3.2.4 Quantité d'eau douce disponible	36
3.2.5 Accessibilité à une ressource en eau douce	39
3.3 Zones vulnérables	39
4 LE DESSALEMENT DE L'EAU	42
4.1 Installations de dessalement dans le monde	42
4.2 Aperçu des technologies de dessalement	45
4.2.1 Relation entre le type d'eau d'alimentation et la technologie de dessalement	46
4.2.2 Étapes du processus de dessalement	50
4.3 Les procédés thermiques : la distillation	52
4.3.1 La distillation à simple effet	53

4.3.2	Distillation multieffets	53
4.3.3	Dessalement multiples flash	53
4.4	Les procédés membranaires	54
4.4.1	Osmose inverse	54
4.4.2	Électrodialyse.....	55
5	ENJEUX RELATIFS AU DESSALEMENT DE L'EAU ET PISTES DE SOLUTIONS	57
5.1	Enjeux environnementaux	57
5.1.1	Prise de l'eau d'alimentation.....	57
5.1.2	Rejet de saumure et d'eau usée.....	58
5.1.3	Écosystèmes terrestres	63
5.1.4	Consommation énergétique.....	64
5.2	Enjeux économiques : Coût des installations.....	65
5.3	Enjeux sociaux	66
5.3.1	Santé humaine.....	66
5.3.2	Acceptabilité sociale	69
5.3.3	Capacité à répondre à la demande des différents secteurs	69
5.4	Innovation pour répondre aux enjeux environnementaux	70
5.4.1	Diminution de l'utilisation de produits chimiques	70
5.4.2	Gestion des rejets de saumure.....	71
5.4.3	Augmentation du taux de récupération de l'eau	72
5.4.4	Énergies renouvelables et efficacité énergétique.....	73
5.4.5	Cas du Japon : le projet « Mega-ton Water system »	76
6	ANALYSE DU DESSALEMENT DE L'EAU COMME OUTIL D'ADAPTATION	77
6.1	Populations vulnérables	77
6.2	Capacité d'augmenter la résilience des populations vulnérables	78
6.3	Caractère durable de l'outil d'adaptation.....	79
6.3.1	Gestion des enjeux environnementaux	80
6.3.2	Gestion des enjeux économiques	82
6.3.3	Gestion des enjeux sociaux.....	83
7	RECOMMANDATIONS	85
7.1	Recommandations quant à la gestion durable des enjeux	85
7.2	Recommandations quant à l'implantation des technologies dans les pays vulnérables.....	87
	CONCLUSION.....	89
	RÉFÉRENCES	91
	ANNEXE 1 – SCHÉMA DE L'INJECTION EN PUIT PROFONDS	98
	ANNEXE 2 – PROGRAMME DE DÉVELOPPEMENT DURABLE DES NATIONS UNIES.....	99

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Bilan de l'effet de serre.....	3
Figure 1.2	Émissions de gaz à effet de serre de nature anthropique de 1970 à 2010 par type de gaz.....	4
Figure 1.3	Projections de l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe en fonction de deux scénarios différents entre les périodes de référence 1986-2005 et 2081-2100.....	6
Figure 1.4	Impacts des changements climatiques.....	7
Figure 2.1	Le cycle de l'eau.....	16
Figure 2.2	Proportion des différents types d'eau sur Terre.....	17
Figure 2.3	Population et prélèvement mondiaux d'eau douce	21
Figure 2.4	Prélèvements de l'eau douce par secteur d'activité et par continent	21
Figure 2.5	Quantité d'eau moyenne en m ³ nécessaire à la production d'une tonne de produits alimentaires.....	22
Figure 2.6	Niveaux de stress hydrique physique par pays.....	26
Figure 3.1	Impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur le cycle de l'eau.....	29
Figure 3.2	Variation des précipitations nettes, 2010 – 2050.....	30
Figure 3.3	Prévision des variations du ruissellement annuel et de l'humidité du sol d'ici 2081-2100	33
Figure 3.4	Carte des interconnexions entre les risques mondiaux, 2019.....	34
Figure 3.5	Impacts de l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe.....	35
Figure 3.6	Prédiction des modifications dans les réserves d'eau douce souterraine.....	38
Figure 3.7	État du stress hydrique physique à l'horizon 2040.....	40
Figure 4.1	Capacité de production d'eau dessalée mondialement.....	43
Figure 4.2	Répartition mondiale de la capacité de production d'eau dessalée et répartition mondiale de l'utilisation par secteur d'activité.....	44
Figure 4.3	Quantité totale et capacité totale des installations de dessalement opérationnelles...	48
Figure 4.4	Répartition mondiale du type d'eau utilisée pour alimenter les installations de dessalement, la technologie utilisée ainsi que la capacité des installations.....	50
Figure 4.5	Unité de dessalement.....	53
Figure 5.1	Principales combinaison type d'eau d'alimentation – technologie.....	59
Figure 5.2	Relations entre le coût des méthodes de gestion et la concentration des rejets de saumure.....	60
Figure 5.3	Volume de saumure produit par pays.....	63
Figure 5.4	Résultats de la technique de monitoring de l'encrassement biologique : mBFR.....	71
Figure 5.5	Technologies d'énergie renouvelable utilisée avec des technologies de dessalement	73

Figure 5.6	Unité de dessalement conçu par ONEKA Technologies.....	75
Figure 5.7	Technologies développées pour la création d'une installation de dessalement durable et économiquement viable.....	76
Tableau 2.1	Concentration des ions principaux dans l'eau salée (mg/l).....	17
Tableau 2.2	Concentration des ions principaux dans trois sources d'eau saumâtre dans les Émirats arabes unis (mg/l).....	18
Tableau 2.3	Estimation de la répartition mondiale des ressources renouvelables en eau douce...	20
Tableau 2.4	Niveaux de stress hydrique.....	25
Tableau 4.1	Répartition des installations de dessalement dans le monde en fonction de la région géographique, du niveau de revenu et du secteur d'activité.....	44
Tableau 4.2	Type d'eau d'alimentation et salinité.....	46
Tableau 4.3	Technologie de dessalement.....	46
Tableau 4.4	Taux de rendement en fonction des combinaisons technologie – eau d'alimentation.	47
Tableau 4.5	Combinaison type d'eau d'alimentation et type de technologie représentant 90 % de la quantité totale d'eau produite par les installations de dessalement.....	49
Tableau 4.6	Eau dessalée produite par osmose inverse.....	55
Tableau 5.1	Moyenne mondiale des coûts de dessalement.....	65
Tableau 6.1	Prévision des populations vulnérable face aux changements climatiques affectant les ressources en eau douce à l'horizon 2040.....	78
Tableau 6.2	Résumé de l'analyse du caractère durable de l'outil d'adaptation.....	79

LISTE DES ACRONYMES

B	Bore
BrO₃⁻	Anion bromate
Br⁻	Bromure
BR	Saumure
BRICS	Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud
BW	Eau saumâtre
CO₂	Dioxyde de carbone
ED	Électrodéionisation
EDR	Électrodialyse inverse
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FVC	Fonds vert pour le climat
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GWh	Gigawatt heure
H₂BO₃⁻	Dihydroxyde Borate
ICBA	<i>International Center for Biosaline Agriculture</i>
IDA	<i>International Desalination Association</i>
km³	Kilomètre cube
kWhm³	Kilowatt heure par mètre cube d'eau d'alimentation
m³	Mètre cube
mBFR	Technologie de monitoring de l'encrassement biologique
MD	Distillation par membrane
MED	Distillation multieffets
mg/l	Milligramme par litre
MSF	Dessalement multiples flash
NaCl	Chlorure de sodium
NF	Nanofiltration
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OMS	Organisation mondiale de la Santé
ONU	Organisation des Nations Unies
PIB	Produit intérieur brut
PW	Eau douce
RO	Osmose inverse
RR	Taux de récupération d'eau
SDWF	<i>Safe drinking water foundation</i>
SW	Eau salée

UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
UNFCCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
UNICEF	Fonds des Nations Unies pour l'enfance
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VP	Compression de vapeur
WBG	Banque mondiale
WEF	Forum Économique Mondial
WRI	<i>World Ressources Institute</i>
WW	Eau usée
WWAP	Programme Mondial pour l'Évaluation des Ressources en Eau

INTRODUCTION

Environ 2 milliards de personnes, réparties dans 86 pays, vivent en situation de stress hydrique moyen à très élevé tandis que 4 milliards de personnes vivent dans un pays en situation de pénurie d'eau au moins un mois par année (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO], 2018a; Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture [UNESCO], 2019a). Or, l'eau est essentielle à la vie. C'est un droit fondamental et un élément déterminant dans le développement durable. Tandis que la demande en eau douce (PW) augmente d'environ 1 % par année, la quantité d'eau douce disponible diminue (Fonds des Nations Unies pour l'enfance [UNICEF], 2017). Les ressources en eau douce subissent plusieurs pressions de nature anthropique qui ont des conséquences sur la quantité et sur la qualité des réserves d'eau douce. Théoriquement, les mécanismes naturels de la Terre assurent le caractère renouvelable des ressources en eau douce. Toutefois, leur surexploitation met en péril leur capacité à se renouveler (Ritchie et Roser, 2018). De plus, les ressources en eau douce subissent une pression supplémentaire en raison des changements climatiques. Le réchauffement planétaire causé par l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) de nature anthropique dans l'atmosphère engendre des variations climatiques qui affectent les systèmes naturels, physiques et humains. Notamment, le cycle de l'eau est grandement affecté par l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe ce qui intensifie les pressions sur les ressources en eau douce. Les effets sur la quantité et la qualité de l'eau se font déjà sentir dans plusieurs régions du monde. Ces impacts devraient s'accroître à mesure où la température moyenne à la surface du globe augmente. Non seulement les changements climatiques ont un effet sur la disponibilité de la ressource, ils ont aussi comme conséquence d'augmenter la demande en eau douce. (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC], 2018; Olivier, 2017) Comment répondre à une demande grandissante avec des ressources qui diminuent? Plusieurs méthodes de gestion encouragent une gestion intégrée et transfrontalière ainsi qu'une utilisation optimale des ressources en eau douce dans tous les secteurs de consommation (FAO, 2018b). Toutefois, ces solutions ne permettent pas de s'adapter à toutes les situations. Les pays du Moyen-Orient et des petits États insulaires utilisent depuis quelques décennies le dessalement de l'eau afin de répondre à la demande en eau douce pour la consommation humaine. Notamment, huit pays consomment plus d'eau douce produite par dessalement que provenant de sources d'eau douce conventionnelles. (Jones, Qadir, Van Vliet, Smakhtin et Kang, 2019). Le dessalement de l'eau est visiblement une solution utilisée par plusieurs pays afin de répondre à leur demande en eau douce. Il serait intéressant de déterminer s'il est possible d'extrapoler cette stratégie d'adaptation mondialement.

En ce sens, l'objectif principal de cet essai est d'analyser le potentiel du dessalement de l'eau comme outil d'adaptation destiné aux populations vulnérables face aux changements climatiques affectant les ressources en eau douce, et ce, dans une perspective de développement durable. Pour y arriver, cet objectif général se divise en trois objectifs spécifiques. Le premier est de cibler les populations vulnérables face aux changements climatiques qui affectent les ressources en eau douce. Le deuxième est de déterminer la capacité des technologies de dessalement à répondre aux besoins de ces populations en matière

d'adaptation. Le troisième est d'analyser le caractère durable de cette solution. En plus de l'objectif principal et des objectifs spécifiques susmentionnés, cet essai tentera d'émettre des recommandations afin d'assurer le caractère durable du dessalement de l'eau et de rendre cet outil accessible aux populations vulnérables.

Pour y arriver, les données et les faits utilisés dans ce travail proviennent de sources diversifiées afin d'avoir une compréhension systémique de la problématique. La majorité des données de nature technique proviennent d'articles scientifiques rédigés en collaboration par plusieurs auteurs ou de livres traitant exclusivement de la problématique. De plus, les documents utilisés ont principalement été trouvés sur des bases de données (exemples Eureka, Repère et ProQuest). Quant à elles, les données factuelles ont principalement été trouvées dans des rapports d'organisations internationales et des rapports gouvernementaux.

Le présent essai est divisé en sept chapitres. Le chapitre un dresse un portrait des causes et des conséquences des changements climatiques ainsi que du besoin d'agir en matière d'adaptation. Le chapitre deux définit le caractère essentiel de l'eau et introduit le concept de crise de l'eau. Le chapitre trois fait le lien entre les deux premiers chapitres en établissant l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau douce. Il est important de mettre en contexte les changements climatiques et d'établir le lien entre ceux-ci et la diminution des ressources en eau douce avant d'entrer dans l'analyse des technologies de dessalement comme solution d'adaptation. Le chapitre quatre expose les principales technologies de dessalement et leur utilisation mondiale actuelle. Le chapitre cinq présente les enjeux relatifs au dessalement de l'eau ainsi que des pistes de solution pour assurer leur gestion durable. Le chapitre six analyse les données présentées dans les chapitres un à cinq afin de répondre aux sous-objectifs, soit de cibler les populations vulnérables dans le cadre de cette analyse ainsi que de statuer sur la capacité des technologies de dessalement à répondre aux besoins en matière d'adaptation et sur le caractère durable de la solution. Le chapitre sept émet des recommandations destinées aux différentes parties prenantes afin de limiter les impacts négatifs du dessalement de l'eau et pour rendre cet outil accessible aux populations dans le besoin. Pour terminer, une conclusion est présentée pour faire le point sur l'analyse.

1 CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET CAPACITÉ D'ADAPTATION

Il y a consensus dans la communauté scientifique quant à la cause principale des changements climatiques ressentis et observés depuis la révolution industrielle : les activités humaines. Les changements climatiques ont des conséquences autant par rapport à la disponibilité des ressources naturelles que par rapport à la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes. (GIEC, 2018) Ce chapitre vise à établir la nécessité de prévoir des solutions d'adaptation face aux impacts du réchauffement planétaire afin d'augmenter la résilience des populations affectées et de diminuer leur vulnérabilité le tout parallèlement aux efforts d'atténuation.

Pour ce faire, une brève revue de la source des changements climatiques, de leurs effets sur l'environnement et sur la vie humaine ainsi que de l'importance des efforts d'adaptation sera effectuée afin de mettre en lumière la nécessité de s'adapter aux effets de ces changements présents et futurs.

1.1 Contexte des changements climatiques

La stabilité du climat sur Terre dépend principalement de la régulation thermique qui s'effectue dans la troposphère. La troposphère est la couche atmosphérique dans laquelle les êtres humains vivent. Elle s'étend du niveau de la mer à entre 10 à 16 kilomètres dans l'atmosphère. Le climat de la Terre s'équilibre naturellement par le biais des radiations infrarouges émises par la Terre et d'une concentration naturelle de GES dans la troposphère créant ainsi un bilan énergétique neutre. Comme il est présenté sur la figure 1.1., la quantité d'énergie solaire entrant dans l'atmosphère doit être la même que la quantité d'énergie terrestre sortant de l'atmosphère.

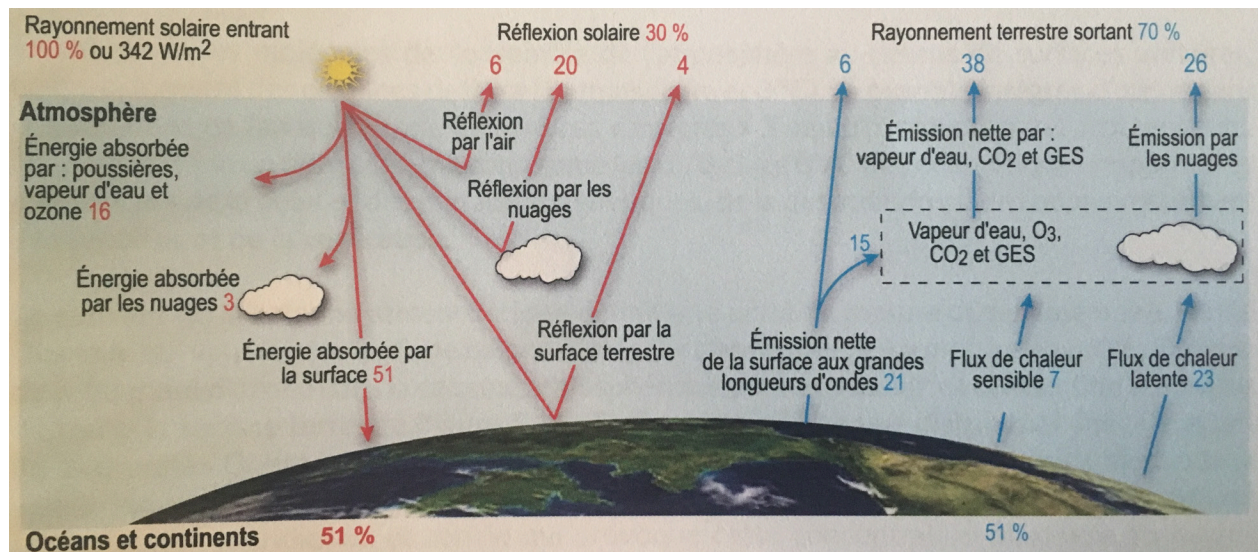


Figure 1.1 Bilan de l'effet de serre (tiré de : Olivier, 2017)

Sans l'incidence des activités anthropiques, la quantité d'énergie provenant du rayonnement solaire vers la Terre est égale à l'énergie émise par la Terre vers le Soleil. Dans cet état, la température moyenne de la

surface de la Terre serait de -18°C . C'est ici qu'interviennent les GES. Les molécules à effet de serre qui sont présentes dans la troposphère absorbent les radiations infrarouges provenant de la Terre. Cela a pour effet d'augmenter leur énergie cinétique. L'énergie cinétique gagnée est rejetée sous forme de chaleur dans la troposphère créant ainsi l'effet de serre. Cela fait augmenter la température de la troposphère et ultimement la température des surfaces terrestres. Grâce à cette interaction entre les radiations infrarouges et les GES, la température moyenne à la surface de la Terre est maintenue à 15°C . Dans le but d'assurer le maintien de l'équilibre climatique, des puits naturels de GES existent afin de capter les surplus de GES présents dans l'atmosphère. L'ensemble de ces phénomènes naturels assurent cet équilibre climatique fragile qui est régi par la quantité de radiations solaires émises par la Terre et la quantité de GES de source naturelle qui se trouvent dans l'atmosphère. (Olivier, 2017)

Par contre, depuis la révolution industrielle, la quantité de GES de source anthropique émise dans l'atmosphère a augmenté de façon exponentielle comme il est possible de constater sur la figure 1.2 (GIEC, 2014a).

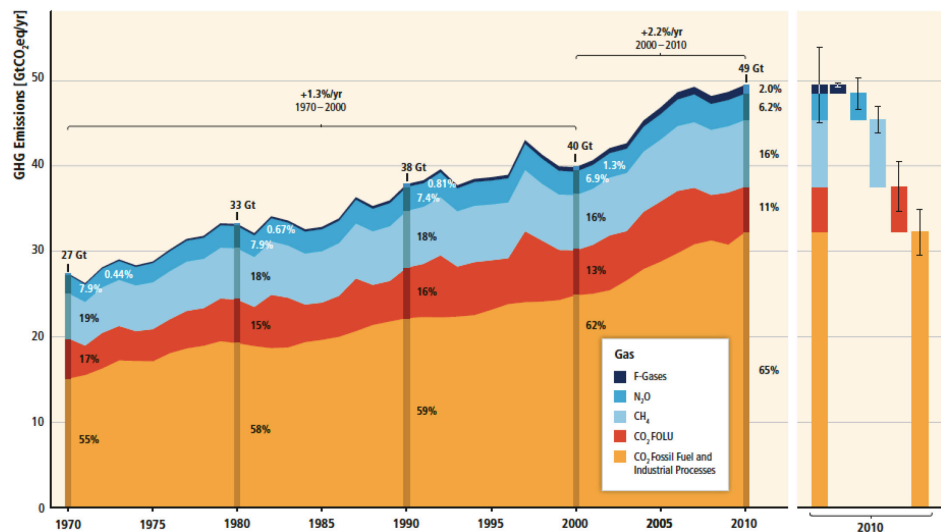


Figure 1.2 Émissions de gaz à effet de serre de nature anthropique de 1970 à 2010 par type de gaz
(tiré de : GIEC, 2014a)

Cela s'explique par la croissance démographique et économique d'après-guerre où les modes de vie et de consommation deviennent très capitalistes et matérialistes dans les pays développés. Durant cette période, les méthodes de production se sont transformées : la production en masse, l'agriculture conventionnelle et les activités extractives des combustibles fossiles se sont multipliées. Ces différentes activités ont des impacts dévastateurs sur l'environnement puisqu'elles déstabilisent les différents écosystèmes et leurs cycles naturels en les polluant, les surexploitant et en détruisant leur biodiversité. (Olivier, 2017) Depuis les années 1970, les pays émergents, soit le BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud), tendent à atteindre un niveau de vie comparable aux pays développés ce qui ne fait qu'augmenter la quantité de GES émis par ces pays. En effet, l'objectif primordial de plusieurs pays développés et émergents est

l'augmentation de leur produit intérieur brut (PIB). Or, la croissance économique est historiquement corrélative d'émission de GES dans l'atmosphère puisque ces nouveaux modes de vie engendrent une augmentation des besoins en énergie. (GIEC 2014a; Nordhaus, 2013; Stern, 2007) L'augmentation des besoins en énergie est imputable à l'augmentation du pouvoir économique qui entraîne l'augmentation de la demande en électricité, en chauffage, en transport, en nourriture et en eau. Or, plus de 80 % de la demande en énergie est comblée par des sources d'énergie fossile responsables de plus de 75 % des émissions de GES de nature anthropique. Avec la croissance démographique et économique mondiale, il est estimé que la demande en énergie augmentera de 80 % d'ici 2050. (GIEC, 2014a, Nordhaus, 2013)

L'augmentation de la quantité de GES de nature anthropique dans l'atmosphère a créé un déséquilibre du bilan énergétique de la Terre. Ces différentes activités humaines ont pour conséquence l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère ce qui engendre le réchauffement planétaire, c'est-à-dire l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe. (GIEC, 2018) La chaleur supplémentaire présente dans la troposphère est en partie absorbée par la surface terrestre, soit le sol et les océans, et est en partie retenue dans l'air. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2014a) formé en 1988 constate un déséquilibre positif dans le bilan énergétique de la Terre depuis 1750 avec une augmentation très significative suivant la révolution industrielle. Cela signifie qu'il y a plus d'énergie qui entre dans l'atmosphère que d'énergie qui en ressort. Comme mentionné précédemment, l'excédent énergétique est absorbé par le système climatique terrestre ce qui cause, à long terme, des changements climatiques accélérés et inhabituels (Olivier, 2017). Environ 40 % de la quantité totale de GES de nature anthropique émis entre 1750 et 2011 sont encore dans l'atmosphère tandis que l'autre 60 % ont été capturées et entreposées par des puits naturels de GES. Les puits naturels de GES sont les plantes et le sol ainsi que les océans. Ces derniers ont à eux seuls capturé et entreposé environ 30 % de ces émissions. (GIEC, 2014a) En raison de l'émission constante de GES de nature anthropique, les mécanismes naturels de captation de GES sont incapables de maintenir l'équilibre climatique de la Terre (GIEC, 2018).

Parallèlement à l'augmentation de la concentration de GES dans l'atmosphère, les données indiquent un réchauffement planétaire ainsi que la survenance de phénomènes météorologies extrêmes. Le GIEC (2018) confirme l'influence des activités anthropiques sur les variations climatiques. Il estime que « les activités humaines ont provoqué un réchauffement planétaire d'environ 1 °C au-dessus des niveaux préindustriels (1850-1900) (...) » (GIEC, 2018). D'après les estimations, la température moyenne à la surface du globe augmente actuellement de 0,2 °C par décennie. Le GIEC (2018) affirme avec un degré de confiance élevé qu'il est probable que le réchauffement planétaire atteigne 1,5 °C entre 2030 et 2052 si le *statu quo* est maintenu. La figure 1.3 illustre les projections de l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe en fonction de deux scénarios différents (GIEC, 2014a).

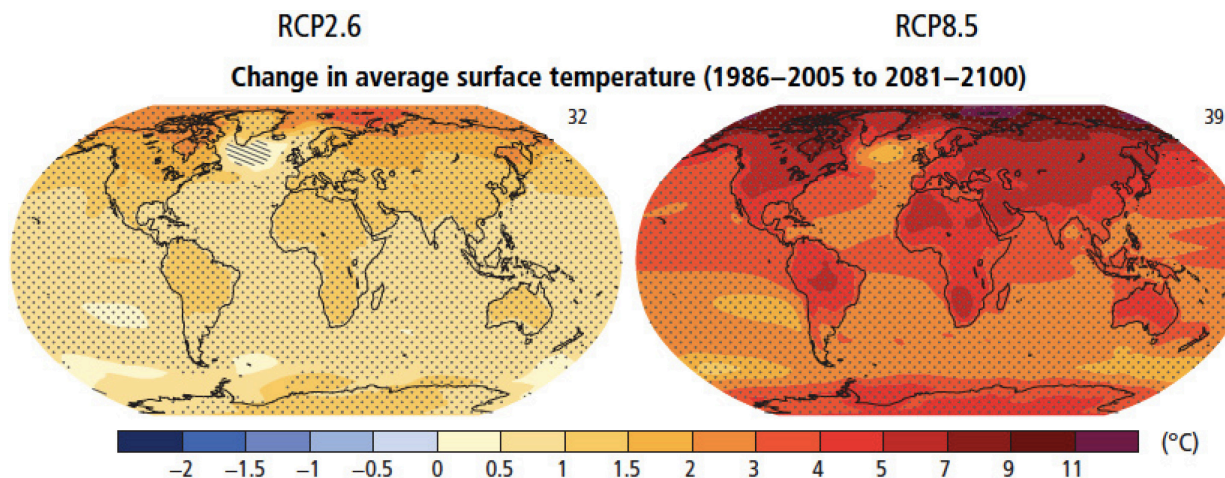


Figure 1.3 Projections de l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe en fonction de deux scénarios différents entre les périodes de référence 1986-2005 et 2081-2100 (inspiré de : GIEC, 2014a)

Les GES ont une durée de vie pouvant atteindre plusieurs dizaines d'années une fois rejetés dans l'atmosphère. Cela signifie que l'effet des GES, soit l'amplification de l'effet de serre, se fait ressentir dans le présent et dans le futur. En d'autres mots, même si en date d'aujourd'hui, plus aucun GES de source anthropique n'était émis dans l'atmosphère, la concentration de GES dans l'atmosphère resterait plus élevée que la normale durant plusieurs années. (GIEC, 2018) De plus, peu importe le point d'émission des GES, les effets des changements climatiques se font ressentir mondialement puisque les GES voyagent dans l'atmosphère. Ce n'est pas nécessairement le pays émetteur qui va ressentir les effets négatifs de ses émissions sur le déséquilibre des cycles naturels. La plupart du temps, les pays les plus affectés par les changements climatiques causés par les GES sont les pays émettant le moins le GES, et ce, en raison de leur situation géographique et des ressources naturelles, financières et matérielles dont ils disposent. (Olivier, 2017)

1.2 Impacts du réchauffement planétaire

Le réchauffement planétaire causé par l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère occasionne des changements climatiques accélérés qui affectent les systèmes physiques, humains et naturels. L'augmentation de la température moyenne à la surface du globe augmente, entre autres, l'intensité et la survenance de canicule, affecte le cycle de l'eau, engendre des variations dans les périodes de sécheresse et dans les précipitations, accentue la fonte des glaces et le dégel du pergélisol, diminue la couverture neigeuse, engendre la hausse du niveau de la mer et augmente la survenance de phénomènes météorologiques extrêmes. Aussi, l'absorption d'une quantité grandissante de dioxyde de carbone (CO₂) par les océans entraîne l'acidification de ces derniers ce qui nuit aux espèces marines. (GIEC, 2018; Olivier, 2017)

Les effets des changements climatiques sont déjà remarquables. La figure 1.4 présente l'impact des changements climatiques sur les systèmes physiques, naturels et humains.

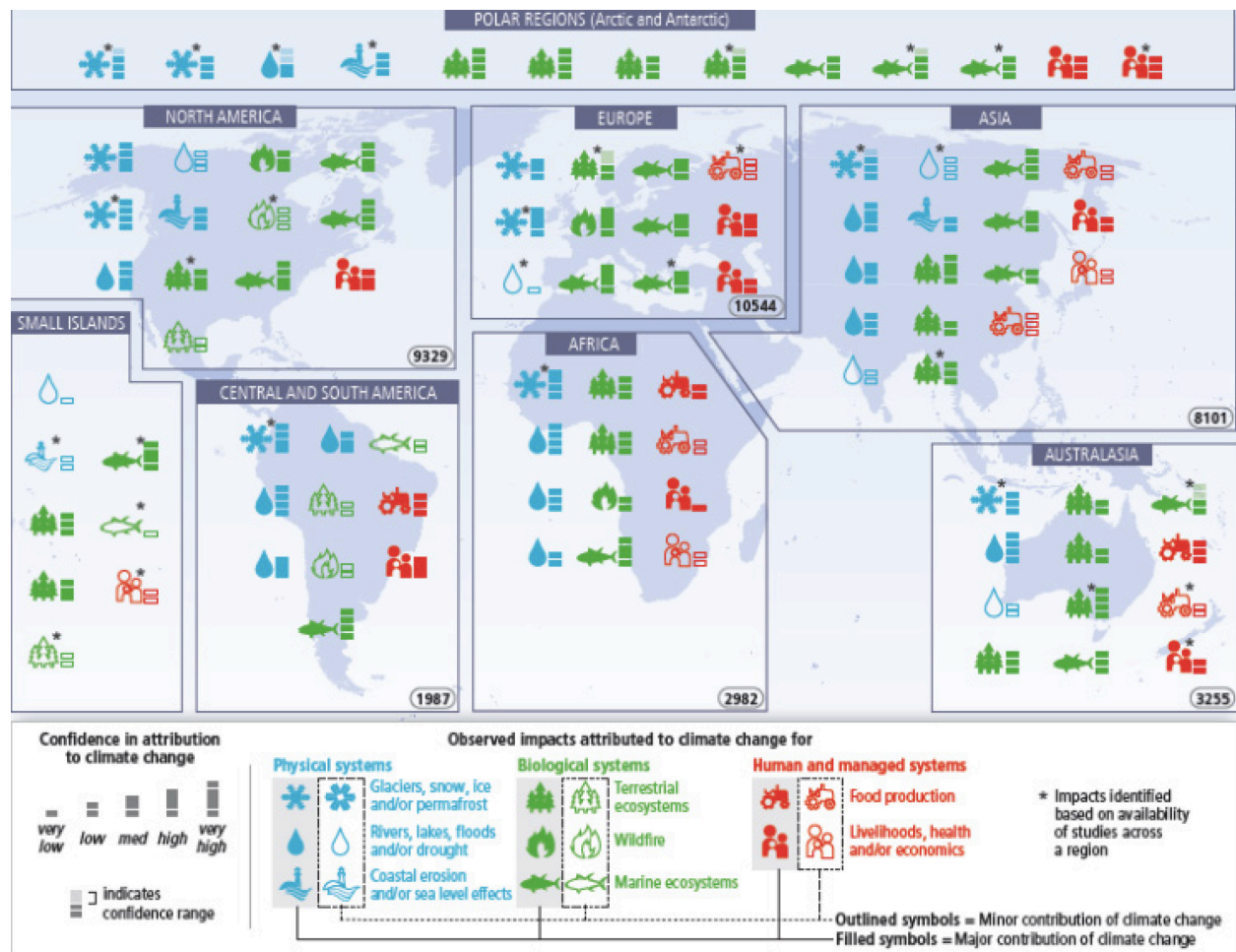


Figure 1.4 Impacts des changements climatiques (tiré de : GIEC, 2014a)

Les changements climatiques mettent à risque le développement durable de la société en ayant des impacts sociaux, environnementaux et économiques. Ces risques augmentent corrélativement avec l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe. Par exemple, les risques sont plus élevés avec un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport à la période préindustrielle qu'avec un réchauffement de 2 °C. De plus, l'impact sur les populations dépend de plusieurs facteurs, dont la vitesse du réchauffement et les spécificités de la région ainsi que du degré de vulnérabilité des populations. (GIEC, 2018) Plus une population est vulnérable, plus les changements climatiques ont des effets dévastateurs. Chaque année, les conséquences des changements climatiques font basculer plus de 26 millions de personnes supplémentaires dans la pauvreté. Injustement, les pays en développement, faibles émetteurs de GES, sont les premiers à ressentir les impacts des changements climatiques en raison de leur vulnérabilité, de leur fragilité économique et de leur dépendance aux services écosystémiques. (Banque mondiale [WBG], 2019a; GIEC, 2014a) Les services écosystémiques sont les bénéfices que les humains retirent de la nature,

comme l'eau douce, la pollinisation et les aliments (Forum économique mondial [WEF], 2019). Leur valeur économique est estimée à 125 billions \$ US par an (Costanza et al., 2014).

Toutefois, les changements climatiques affectent négativement les écosystèmes naturels. Notamment, les risques d'extinction d'une quantité élevée d'espèces de la faune et de la flore augmentent avec le réchauffement planétaire. En effet, les variations climatiques forcent les espèces affectées à modifier leurs activités, leurs routes et périodes de migration et leur territoire ce qui a pour effet de déstabiliser l'équilibre des écosystèmes à plusieurs égards. Les milieux naturels sont aussi victimes des catastrophes naturelles comme les sécheresses, les inondations et les feux de forêt. (GIEC, 2014a; GIEC, 2018) De plus, l'augmentation de la température engendre des variations dans le cycle de l'eau ce qui a pour conséquence d'affecter les ressources en eau douce disponibles sur le plan de la qualité, de la quantité et de l'accessibilité. Cela a des répercussions directes sur la sécurité alimentaire mondiale. En effet, l'agriculture est dépendante de la disponibilité des ressources en eau douce et de la température afin d'assurer une bonne récolte. Plusieurs pays, entre autres d'Afrique et d'Asie, verront leur rendement agricole diminuer en raison des changements climatiques qui ont des effets néfastes sur l'agriculture, la plupart du temps. En effet, les pays plus au nord, comme le Canada, verront leur rendement agricole augmenter temporairement en raison de l'augmentation des températures. Certaines terres antérieurement non cultivables en raison des températures trop froides seront maintenant cultivables. (GIEC, 2014a; WBG, 2019a).

Ces nouvelles pressions ont des effets sur la santé et sur la sécurité des populations, notamment à cause de la pénurie d'eau et de l'insécurité alimentaire qui affectent un nombre grandissant de personnes (GIEC, 2018). D'ici 2030, les coûts de santé directement reliés aux changements climatiques pourraient atteindre 4 millions \$ US par année. Les chaleurs accablantes augmentent la vulnérabilité des personnes âgées et des personnes ayant des problèmes de santé comme des problèmes cardiaques et des problèmes respiratoires. Aussi, l'augmentation des températures dans certaines régions augmente la survenance de maladies en accentuant leur propagation et en poussant les maladies à migrer vers un nouveau territoire. De plus, les phénomènes météorologiques extrêmes mettent la sécurité des populations touchées en danger et entraînent leur lot de décès et de blessés ce qui provoque la fragilisation des populations qui voient leurs écosystèmes perturbés. (WBG, 2019a; GIEC, 2014a) En 2017, environ 18,8 millions de personnes ont été déplacées à la suite de la survenance de phénomènes météorologiques (Internal displacement monitoring centre, 2018).

En aval des impacts des changements climatiques sur l'environnement et sur la santé et la sécurité des populations affectées, il y a le coût économique. Ce coût augmente avec l'inaction des pays à s'adapter aux changements climatiques. Il est plus économique d'investir maintenant pour se préparer aux effets des changements climatiques que d'attendre et d'agir en aval. (Organisation de coopération et de développement économiques [OCDE], 2017)

1.3 Lutte contre les changements climatiques

En 2015, à la suite de la 21^e Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, l'Accord de Paris (Accord) a été adopté par près de 200 pays avec comme objectif principal de lutter collectivement contre la menace des changements climatiques. C'est un accord non contraignant où aucune sanction n'est prévue dans l'éventualité où un pays signataire ne respecterait pas les devoirs et les obligations prévus par l'Accord. (Gouvernement du Canada, 2016; Organisation des Nations Unies [ONU], 2015)

Ce qui ressort de l'Accord de Paris est le sous-objectif prévu à l'article 2 paragraphe 1 alinéa a) pour atteindre l'objectif principal, soit de limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale au-dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et de poser des actions supplémentaires afin que cette augmentation ne dépasse pas 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici la fin du siècle puisque cela permettrait de limiter les impacts irréversibles des changements climatiques, comme la montée du niveau de la mer qui menace plusieurs pays (Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques [UNFCCC], 2015). Par ailleurs, aucune cible de réduction n'est définie dans l'Accord de Paris. Chaque pays a la responsabilité de définir des cibles de réduction des émissions de GES de son pays en fonction de sa situation dans le but d'atteindre l'objectif commun, soit de limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale au-dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici la fin du siècle. Tous les pays signataires ont dû adopter des cibles pour 2025 ou 2030. Ces cibles seront revues à la hausse tous les 5 ans. Comme il a été mentionné précédemment, la durée de vie des GES est de plusieurs années. Cela signifie que pour limiter l'augmentation de la température mondiale de la terre d'ici la fin du siècle, il est impératif d'agir immédiatement sur les quantités de GES émises annuellement à l'échelle mondiale puisque ce qui est émis aujourd'hui a des effets dans le futur. (ONU, 2015; UNFCCC, 2020b)

Toutefois, l'article 2 de l'Accord de Paris prévoit aussi deux autres sous-objectifs pour lutter contre la menace des changements climatiques qui sont souvent mis au second rang :

« b) renforçant les capacités d'adaptation aux effets néfastes des changements climatiques et en promouvant la résilience à ces changements et un développement à faible émission de gaz à effet de serre, d'une manière qui ne menace pas la production alimentaire;

c) Rendant les flux financiers compatibles avec un profil d'évolution vers un développement à faible émission de gaz à effet de serre et résilient aux changements climatiques. » (ONU, 2015)

L'adaptation, la résilience et la vulnérabilité des populations face aux changements climatiques sont donc aussi au cœur de l'Accord et une importance aussi grande que le maintien de l'augmentation de la température mondiale en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici la fin du siècle devrait leur être accordée (ONU, 2015). Malgré les efforts mondiaux d'atténuation aux changements climatiques, il est rationnel de dire que l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de GES permettant de limiter l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe à 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici la fin du siècle est incertaine. Selon les données disponibles, le GIEC (2014a) évalue la

probabilité d'atteindre la cible de l'Accord de Paris à plus improbable que probable. Notamment, cela est justifié par le fait que, suivant les mesures d'atténuation annoncées par les pays signataires de l'Accord de Paris, les projections des émissions de GES indiquent un réchauffement planétaire de plus de 1,5 °C d'ici 2030. Il est donc nécessaire de se préparer à répondre aux impacts des changements climatiques présents et futurs. La capacité d'adaptation d'une population déterminera sa résilience face aux changements climatiques : plus une société est bien adaptée, plus elle est résiliente et moins elle est vulnérable face aux changements climatiques. À long terme, cela signifie que les impacts des changements climatiques sur le développement durable, comme la pauvreté et les inégalités, seront moindres. L'atteinte des objectifs de développement durable de ONU prévus dans son Programme de développement durable à l'horizon 2030 repose, entre autres, sur l'efficacité des mesures d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques. Les objectifs de développement durable servent de guide afin d'évaluer la pertinence de ces mesures en fonction de leurs impacts négatifs et positifs prévisibles sur les objectifs. (GIEC, 2018)

1.4 Capacité d'adaptation, résilience et vulnérabilité

Les données scientifiques sont claires : les changements climatiques se font actuellement ressentir dans plusieurs régions du monde et vont continuer de s'accroître sur plusieurs années même si l'objectif de l'Accord de Paris est atteint (GIEC, 2018). Il est donc nécessaire de mettre autant d'efforts dans l'adaptation aux changements climatiques que dans l'atténuation des changements climatiques. La capacité d'adaptation constitue en la capacité d'un système à s'adapter aux changements climatiques présents et futurs et de s'ajuster au niveau économique, environnemental et social pour modérer les dommages potentiels, pour profiter des opportunités ou pour faire face aux conséquences. (Climat Adapt, s. d.; UNFCCC, 2020b) En 2001, le Comité pour l'Adaptation des Nations Unies a été mis en place afin de tenter d'amener les gens à travailler collectivement vers une vision commune de l'adaptation (UNFCCC, 2020b). La coopération internationale est essentielle à l'atteinte des objectifs de l'Accord de Paris dans un contexte de développement durable (GIEC, 2018).

L'adaptation se fait souvent par le biais d'un plan d'adaptation. Ce processus permet de cibler les risques associés aux changements climatiques et de se préparer afin de minimiser les impacts environnementaux, sociaux et économiques de ces changements et donc de réduire la vulnérabilité des populations en augmentant leur résilience. Le coût et les efforts effectués en amont pour s'adapter aux futurs changements vont donc permettre d'économiser en aval, en capital humain, environnemental et économique puisqu'une société bien adaptée ressentira moins les effets négatifs des changements climatiques. (Climat Adapt, s.d.; GIEC, 2018) L'adaptation se situe au niveau local et est propre à la situation de chaque communauté. Il est donc nécessaire de faire un plan d'adaptation évolutif adapté aux particularités géographiques, culturelles et économiques de chaque région. Les changements climatiques sont différents d'une région à l'autre, il est important de prendre le temps de cibler les vulnérabilités et les risques spécifiques à une région ainsi que la probabilité et la gravité de leurs effets et de leurs conséquences sur la région en question. Plus une

région est outillée à répondre à un risque, moins ce risque est grand et donc plus la région devient résiliente face au changement. (Horton et al., 2010)

Les pays en développement sont les plus susceptibles de subir les conséquences des changements climatiques en raison de leur vulnérabilité accentuée par leur état de pauvreté et de leur dépendance aux services écosystémiques, d'où l'importance de mettre l'accent sur les mesures d'adaptation (Oxfam, 2018). Notamment, par le biais de son Plan d'action sur les changements climatiques, l'adaptation et la résilience, la Banque Mondiale (2019c) prévoit investir 50 milliards \$ US sur une période de cinq ans directement dans des mesures d'adaptation. D'ailleurs, en lien avec les moyens énoncés à l'article 2 de l'Accord de Paris afin de répondre aux changements climatiques, l'article 7 de cet accord est aussi un objectif mondial concernant l'amélioration de la capacité d'adaptation de l'ensemble des pays face aux changements climatiques actuels et futurs dans le but d'augmenter leur résilience pour ainsi réduire leur vulnérabilité face aux changements climatiques, le tout dans une perspective de développement durable à faibles émissions de GES. Tous les pays signataires doivent adopter un plan d'adaptation aux changements climatiques à portée nationale. De plus, l'article 9 reprend l'engagement des pays du Nord envers les pays du Sud pris en 2009 à Copenhague et confirmé en 2010 à Cancún. L'article prévoit que les pays développés du Nord énumérés à l'annexe 2 de l'Accord de Paris doivent fournir les ressources financières nécessaires afin de venir en aide aux pays en développement quant à leur adaptation face aux changements climatiques. Les pays non énumérés dans cette annexe sont invités à contribuer sur une base volontaire. L'engagement des pays du Nord à venir en aide financièrement aux pays du Sud lorsqu'il est question d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques vient du fait que des millions de personnes subissent les conséquences dévastatrices des changements climatiques lorsque le mode de vie de ces populations a contribué le moins aux changements climatiques. Les populations les plus pauvres et les moins responsables sont les plus touchées. (ONU, 2015; Oxfam, 2018)

L'Accord prévoit que le mécanisme financier de la convention, soit le Fonds vert pour le climat (FVC). Le FVC a été inclus dans l'Accord de Paris en lui donnant le rôle important de mécanisme de gestion financière. Le FVC est un fonds relevant des Nations Unies qui a été fondé en 2010 à la suite des Accords de Cancún. Il a pour seuls mandats de servir la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC) suivant ses principes et priorités et d'assurer la gestion des fonds attribués en les allouant équitablement entre des projets visant à l'atténuation et à l'adaptation aux changements climatiques dans les pays en développement. D'ordre général, le FVC tente d'investir dans des projets ayant de faibles émissions de GES et qui augmentent la résilience de la population face aux changements climatiques. Le financement de ce fonds provient de différentes sources publiques et privées. Donc, théoriquement, les pays développés devraient contribuer à ce fonds afin d'aider les pays en développement à s'adapter face aux changements climatiques. (Green climate fund, s. d.) L'Accord de Paris prévoit un objectif de contribution total commun de 100 milliards \$ US par année d'ici 2020 provenant des pays développés à destination des pays en développement afin de les aider à s'adapter aux changements climatiques. Toutefois, aucune donnée précise n'est prévue quant à la contribution financière attendue de chaque pays

développé ni de mécanisme encadrant les contributions et l'allocation des contributions. (ONU, 2015; UNFCCC, 2020a) À ce jour, la contribution de l'ensemble des pays développés est estimée à environ 48 milliards \$ US brut par année. Seulement 20 % des contributions sont consacrées à des mesures d'adaptation, le reste des contributions étant consacrées à des mesures d'atténuation. Cette contribution paraît faible lorsqu'il est estimé que l'adaptation aux changements climatiques dans les pays en développement coûtera entre 140 et 300 milliards \$ US d'ici 2025. (Oxfam, 2018)

En raison du manque d'encadrement autour du financement international, des lignes directrices ont été établies lors de la 24^e Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques ayant lieu en décembre 2018 à Katowice en Pologne. Dorénavant, le Fonds pour l'adaptation créé en 2001 lors du Protocole de Kyoto est partie intégrante de l'Accord de Paris. Ce fonds est responsable de financer des projets spécifiques pour l'adaptation aux changements climatiques dans des pays en développement. De plus, le comité responsable des finances a pour mandat de préparer un rapport faisant état des besoins financiers des pays en développement en matière d'adaptation et d'atténuation aux changements climatiques ainsi que d'analyser l'allocation des investissements afin d'assurer la croissance d'une société faible en carbone et résiliente aux changements climatiques. (UNFCCC, 2019; UNFCCC, 2020a)

2 L'EAU DOUCE : ÉLÉMENT ESSENTIEL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'eau douce est essentielle à la vie humaine. Non seulement le corps humain a besoin d'eau douce pour survivre, une quantité suffisante d'eau douce est aussi nécessaire à la production de nourriture. Sans eau, il n'y a pas de croissance, pas de nourriture, pas de vie sur terre. Les pays membres de l'Organisation des Nations Unies (ONU) considèrent que « l'eau est essentielle au développement durable et à l'élimination de la pauvreté et de la faim » (ONU, s. d.a). En effet, le manque d'eau a de graves répercussions sur la santé et la sécurité des populations en augmentant, entre autres, le risque d'insécurité alimentaire, de pauvreté, d'inégalités et de développement de maladies (UNICEF, 2017).

La présente section a pour but de situer la problématique de l'eau à l'international en faisant état de la place de l'eau dans le droit international, de la répartition des ressources mondiales en eau ainsi que de l'utilisation mondiale de l'eau. Pour terminer, un aperçu des enjeux entourant la disponibilité de l'eau douce conclura ce chapitre.

2.1 Droit international de l'homme à l'eau

En 2010, en raison du caractère essentiel de l'eau, le droit de l'homme à l'eau et à l'assainissement a été officiellement reconnu pour la première fois à l'international comme étant un droit fondamental par l'Assemblée générale des Nations Unies (Clemenceau, 2018). Cela signifie que les États doivent travailler de concert afin d'assurer l'accès universel et équitable à l'eau potable, à prix abordable. Pour se faire, il faut que des ressources en eau douce soient disponibles et physiquement accessibles pour l'utilisation et la consommation humaine. (ONU, s. d.a) Selon le rapport de 2019 du Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP), « la disponibilité des ressources en eau dépend de la quantité d'eau physiquement disponible et de la façon dont elle est stockée, gérée et allouée aux divers utilisateurs (...) » (UNESCO, 2019.a). Quant à elle, l'accessibilité à l'eau fait référence à la façon dont l'eau est fournie ou obtenue, soit le réseau d'alimentation (UNESCO, 2019a). Or, cette reconnaissance du droit de l'homme à l'eau et à l'assainissement a une valeur purement symbolique puisqu'il a été reconnu dans une résolution non contraignante, c'est-à-dire à caractère non obligatoire. À l'international, le droit à l'eau est toutefois reconnu pour des catégories spécifiques de personnes à travers certaines conventions contraignantes, donc à caractère obligatoire, notamment dans la Convention internationale des droits de l'enfant. (Clemenceau, 2018)

Bien que le droit de l'homme à l'eau soit reconnu à l'international, il reste encore plusieurs étapes avant qu'il soit effectif. À ce jour, plusieurs milliards de personnes voient leur droit à l'eau brimé et non respecté à travers le monde. Même si le droit international interdit toute forme de discrimination face à l'exercice du droit de l'homme à l'eau, la réalité est toute autre. La répartition géographique des sources renouvelables d'eau douce crée d'entrée de jeu des inégalités qui sont par la suite accentuées par divers facteurs sociaux et économiques. La pauvreté, les minorités ethniques et le sexe sont les motifs de discrimination les plus récurrents en raison de la vulnérabilité de ces groupes de personnes. Quant à eux, les changements

climatiques ne font qu'accentuer la crise de l'eau et mettent en péril la vie de millions de personnes. (UNESCO, 2019a) La crise de l'eau se définit comme étant « un déclin significatif dans la qualité et la quantité d'eau douce disponible ce qui cause des effets néfastes sur la santé humaine et/ou sur les activités économiques » (traduction libre : WEF, 2019).

À la lumière des enjeux universels reliés à la disponibilité et à l'accessibilité de l'eau douce, le 1^{er} janvier 2016, l'ONU a adopté un objectif spécifique, l'objectif 6, dans le cadre de son Programme de développement durable à l'horizon 2030. (ONU, s. d.a) L'objectif 6 est de « garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable » (ONU, s. d.a). La proportion de la population ayant accès à des services d'approvisionnement en eau potable augmente lentement. En date de 2017, encore 785 millions de personnes n'avaient pas accès à de l'eau potable (Conseil économique et social des Nations Unies, 2019).

Plusieurs défis entourent l'atteinte de l'objectif 6 du Programme de développement durable des Nations Unies, notamment puisque les ressources en eau douce sont limitées. D'ailleurs, en novembre 2016, l'Assemblée générale des Nations Unies a adopté une résolution à l'unanimité afin de lancer une initiative pour éviter une crise mondiale de l'eau, soit la Décennie internationale pour l'action sur le thème de « l'eau au service du développement durable » (2018-2028) (ONU, 2016). L'objectif principal de cette initiative est d'encourager la collaboration des acteurs publics et privés vers l'atteinte des objectifs internationaux reliés à l'eau ainsi que pour l'implantation de programmes et de projets dans le but d'assurer une gestion intégrée des ressources en eau douce permettant ainsi le développement durable des populations (ONU, 2018).

2.2 L'eau sur Terre

L'eau a une place très importante sur Terre prenant différentes formes et totalisant environ 1 385,9 millions de kilomètres cube (km³) (United States Geological Survey [USGS], s. d.a). Elle recouvre 72 % de la surface du globe sous forme d'océans, de lacs et de rivières. Elle se trouve aussi dans l'air, sous la forme de vapeur d'eau, dans les calottes glaciaires et les glaciers, dans les sols, sous forme d'humidité ainsi que dans des aquifères souterrains. Suivant le cycle hydrologique, les molécules d'eau sont en constant mouvement passant de la forme solide à la forme liquide à la forme gazeuse. (USGS, s. d.a; Centre d'information sur l'eau, s. d.)

2.2.1 Le cycle de l'eau

La molécule d'eau a la capacité de changer d'état lorsqu'elle est soumise à certaines conditions en fonction de la température et de la pression. Le cycle de l'eau est le système par lequel l'eau passe d'une forme gazeuse, à une forme liquide, à une forme solide. Il joue un rôle primordial dans le caractère renouvelable des ressources en eau douce puisqu'il contrôle les déplacements de l'eau sur terre et donc la quantité d'eau qui se retrouvera ultimement dans les réservoirs d'eau douce. (USGS, s. d.a; UNESCO, 2012) Comprendre le cycle de l'eau et ses variations permet d'effectuer une gestion optimale des ressources en eau douce et de faire face aux défis que représentent l'augmentation de la population et la diminution de la quantité d'eau

douce disponible. Les précipitations ainsi que l'évapotranspiration sont les deux principaux facteurs qui influencent le cycle de l'eau. (Gouvernement du Canada, 2013)

En effet, les précipitations représentent la quantité d'eau contenue dans les nuages qui retombent sur terre, sous forme solide ou liquide. La quantité et la fréquence des précipitations dépendent de l'évapotranspiration. L'évapotranspiration réfère à deux phénomènes, soit l'évaporation et la transpiration. D'une part, l'évaporation est le phénomène par lequel l'eau de surface passe de l'état liquide à l'état gazeux sous l'effet de la chaleur. L'eau devient donc de la vapeur d'eau. Certaines conditions sont plus propices à l'évaporation telles que : la chaleur, le vent, une faible pression atmosphérique, un faible taux d'humidité et la dimension de la surface de l'eau en contact avec l'atmosphère. D'autre part, la transpiration est le phénomène par lequel l'eau sous forme liquide sort d'un corps vivant, principalement des végétaux, pour passer à la forme gazeuse, s'évaporer et rejoindre l'atmosphère. À la suite de l'évaporation, l'eau sous forme gazeuse se condense à mesure qu'elle monte dans l'atmosphère et que la température de l'air diminue. Environ 2/3 de l'eau des précipitations retournera à l'atmosphère par le processus d'évaporation. Il est donc possible de conclure que plus le taux d'évaporation est grand, moins il y a d'eau disponible sous forme liquide sur terre. Le taux d'évaporation peut donc avoir un grand impact sur la crise de l'eau. (Centre d'information sur l'eau, s. d.; Robinson et Ward., 2000)

La condensation est le passage de la forme gazeuse à la forme liquide ce qui permet la création des nuages. Lorsque les nuages deviennent trop lourds à cause de la quantité d'eau qu'ils contiennent, il y a des précipitations. (Gouvernement du Canada, 2013; USGS, s. d.a) Le cycle de l'eau est influencé par la rotation de la Terre autour du Soleil ce qui crée des variations dans la quantité des précipitations en fonction des saisons, en particulier dans les tropiques. Ces régions font face à de grandes variations de précipitations entre la saison sèche et la saison des pluies ce qui crée des défis de gestion supplémentaires puisque la quantité d'eau disponible varie en fonction des saisons. (UNESCO, 2012)

L'eau des précipitations tombe soit dans les océans et devient de l'eau salée (SW) ou bien elle tombe sur terre. L'eau des précipitations qui tombe sur terre sert à répondre aux besoins en eau des différents écosystèmes et à alimenter les réservoirs d'eau douce. L'eau rejoint les réserves d'eau douce soit par le processus du ruissellement ou par le processus de l'infiltration. D'une part, le processus de ruissellement consiste en l'écoulement de l'eau en surface. D'autre part, le processus d'infiltration se sépare en deux catégories, soit le ruissellement hypodermique qui signifie que l'eau s'infiltré dans le sol pour ensuite circuler à l'horizontale, soit la recharge ce qui consiste en l'infiltration de l'eau à la verticale jusqu'à l'aquifère comme il est possible de constater sur la figure 2.1 qui illustre le cycle de l'eau. (Gouvernement du Canada, 2013; USGS, s. d.a)

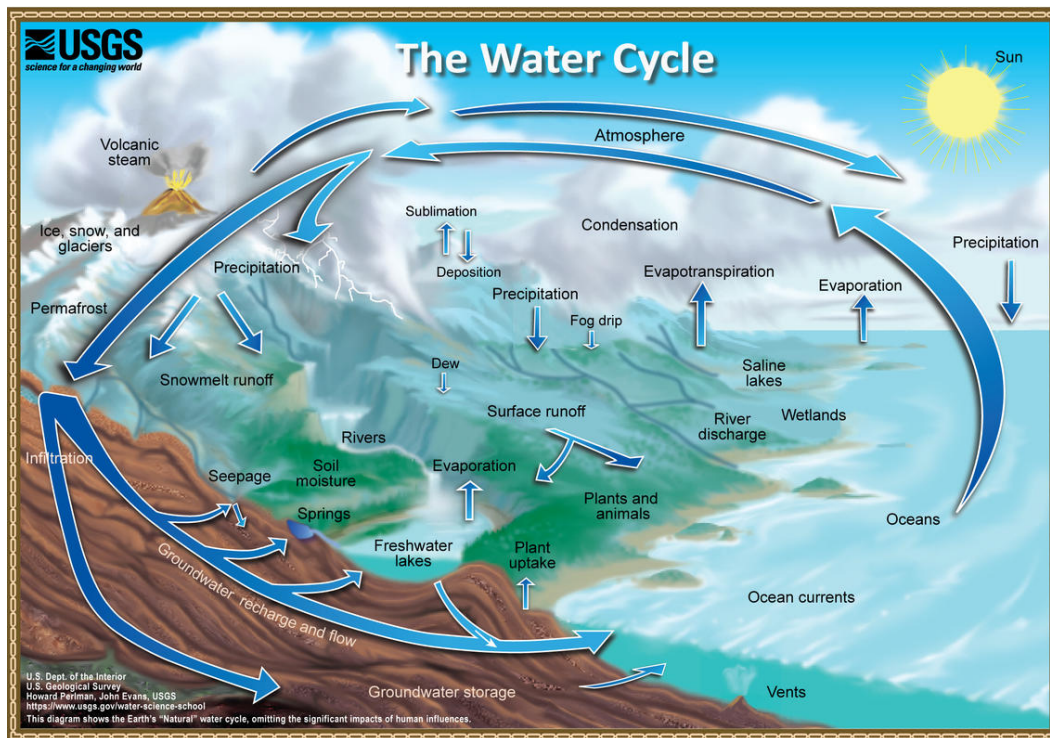


Figure 2.1 Le cycle de l'eau (tiré de : USGS, s. d.a).

La quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol pour rejoindre la nappe phréatique dépend de facteurs qui influencent la perméabilité du sol. La vitesse maximale à laquelle l'eau est capable de s'infiltrer dans le sol est la capacité d'infiltration. Elle joue un rôle important dans l'alimentation des réserves d'eau souterraine. Elle dépend d'une série de caractéristiques, mais est principalement influencée par la porosité du sol : plus le sol est composé de particules homogènes de grande taille, plus la capacité d'infiltration est grande. L'infiltration de l'eau dépend aussi de la fréquence et de l'intensité des précipitations. Si les précipitations tombent à la même vitesse que la capacité d'infiltration du sol, la totalité des précipitations sera en mesure de s'infiltrer dans le sol. Par contre si la vitesse des précipitations est plus élevée que la capacité d'infiltration du sol, le sol sera saturé avant la fin des précipitations et l'excédent de l'eau alimentera le ruissellement de surface. Aussi, lors de la fonte des neiges, une partie de l'eau s'infiltré dans le sol en fonction de la capacité d'infiltration du sol afin d'alimenter les nappes phréatiques. La vitesse de la fonte a donc un impact important sur le ruissellement et l'infiltration de l'eau puisqu'elle a un effet sur la vitesse de saturation du sol. (Robinson et Ward., 2000)

2.2.2 Ressources mondiales en eau

Le volume d'eau sur Terre reste constant. Ce qui change dans le temps est la quantité disponible des différents types d'eau, soit les proportions d'eau salée, d'eau saumâtre (BW) et d'eau douce. La figure 2.2 présente la proportion des types d'eau. (USGS, s. d.a) L'eau contient une quantité variable de matières dissoutes totales composés majoritairement de sels inorganiques ainsi que de matières organiques en faible quantité (Safe drinking water foundation [SDWF], 2017).

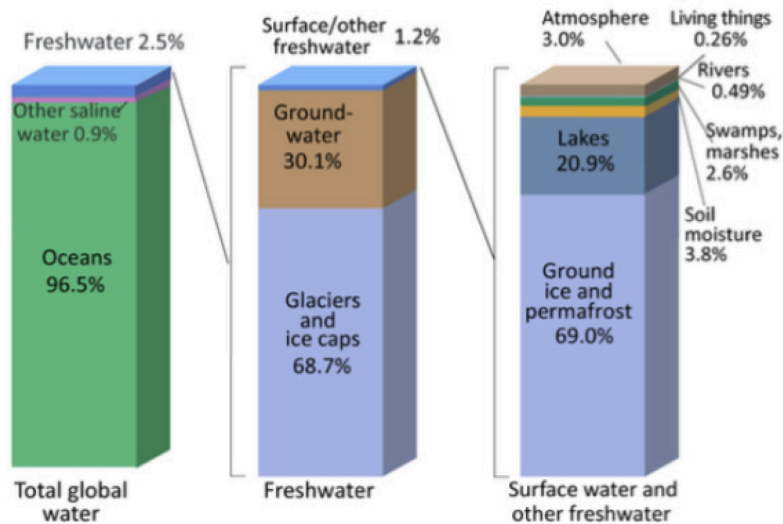


Figure 2.2 Proportion des différents types d'eau sur Terre (tiré de : USGS, s. d.a).

La différence entre les différents types d'eau est la salinité de l'eau, soit la concentration en sels dissous qui s'exprime en milligramme par litre (mg/l) (Rover, 2017). L'eau salée représente plus de 96 % du total de l'eau disponible, soit l'eau des océans et des mers (USGS, s. d.a). C'est le type d'eau le plus facilement accessible et le plus disponible. L'eau salée réfère à une eau dont la concentration en sels dissous est élevée, soit entre 20 000 mg/l et 50 000 mg/l (Jones et al., 2019). Le tableau 2.1 fait état de la concentration des ions principaux présents dans l'eau salée. À titre d'exemple, l'eau des océans a généralement une concentration en sels d'environ 35 000 mg/l dont environ 85 % de chlorure de sodium (NaCl). En raison de sa salinité élevée, ce type d'eau est inadéquate, voire nocive, pour la consommation humaine, l'agriculture et plusieurs procédés industriels. (Ritchie et Roser, 2018; USGS, s. d.b)

Tableau 2.1 Concentration des ions principaux dans l'eau salée (mg/l) (inspiré de : Ladewig et Asquith, 2012).

Ion	Moyenne mondiale	Mer de la Méditerranée	Wonthaggi, Australie
Chlorure, Cl^-	18,980	21,000 – 23,000	20,200
Sodium, Na^+	10,556	10,945 – 12,000	11,430
Sulfate, SO_4^{2-}	2,649	2,400 – 2,965	2,910
Magnésium, Mg^{2+}	1,272	1,371 – 1,550	1,400
Calcium, Ca^{2+}	400	440 – 470	420
Potassium, K^+	380	410 – 620	490
Bicarbonate, HCO_3^-	140	120 – 161	n.d.
Bromure, Br^-	65	45 – 69	62
Borate, H_2BO_3^-	26	n.d.	n.d.
Strontium, Sr^{2+}	13	5 – 7.5	7.6
Fluorure, F^-	1	1.2 – 1.55	0.9
TOTAL	34,482	38,000 – 40,000	n.d.

Quant à elle, l'eau saumâtre représente moins de 1 % du total de l'eau disponible. L'eau saumâtre est un mélange entre de l'eau douce et de l'eau salée. Elle se retrouve dans les réservoirs souterrains ainsi que dans certains lacs, rivières et estuaires. La salinité des réservoirs d'eau souterrains peut augmenter suite à l'infiltration de l'eau salée ou en raison de l'infiltration de l'eau des précipitations passant par des sols riches en minéraux. À long terme, lorsque ce phénomène se répète, la concentration en sels de l'eau des nappes phréatiques augmente et devient de l'eau saumâtre. (Ritchie et Roser, 2018) Par exemple, 75 % des réserves souterraines en eau de l'État du Nouveau-Mexique aux États-Unis contiennent de l'eau saumâtre. Ces eaux souterraines sont donc inutilisables sans traitement pour la plupart des utilisations en raison de leur concentration en sels dissous trop élevée. Quant à eux, certains lacs et rivières voient leur concentration en sel augmenter à mesure que la quantité d'eau disponible dans cette réserve diminue. Quand la ressource est surexploitée, les réserves ne parviennent pas à se régénérer aussi vite qu'elles sont exploitées ce qui constitue un mode de gestion non soutenable d'une ressource qui est pourtant renouvelable. C'est, entre autres, le cas du lac Mono en Californie qui historiquement était le lac Russel. En raison de l'utilisation non durable faite des ressources en eau douce du lac, l'eau du lac est maintenant saumâtre et la quantité d'eau disponible dans le lac diminue d'environ 1 mètre par année. Contrairement à l'eau salée, l'eau saumâtre peut être utilisée pour certains types d'agriculture et de procédés industriels en fonction de sa concentration en sels dissous. (Ritchie et Roser, 2018; USGS, s. d.b) La concentration en sels dissous de l'eau saumâtre varie entre 1 000 mg/l et 20 000 mg/l (Jones et al., 2019). Le tableau 2.2. illustre la concentration des ions principaux trouvés dans 3 sources d'eau saumâtre situées dans les Émirats arabes unis.

Tableau 2.2 Concentration des ions principaux dans trois sources d'eau saumâtre dans les Émirats arabes unis (mg/l) (inspiré de : Ladewig et Asquith, 2012).

Ion	Al Wagan	Al Qua'a	Um Al-Zumool
Chlorure, Cl ⁻	3,827	6,213	9,443
Sodium, Na ⁺	741.59	451.13	2,482
Sulfate, SO ₄ ²⁻	539.22	394.38	1,746
Calcium, Ca ²⁺	146.31	162.36	456.40
Magnésium, Mg ²⁺	112	104	194
Potassium, K ⁺	28.46	27.24	110.1
Nitrate, NO ₃ ⁻	8.99	1.57	12.70
Phosphure, P ³⁻	n.a.	0.14	n.a.
TOTAL	5,404	7,354	14,444

Bref, les réserves d'eau salée et d'eau saumâtre représentent plus de 97 % de l'eau disponible sur Terre. Cela signifie que moins de 3 % de l'eau disponible est de l'eau douce. Or, l'eau douce est le type d'eau qui est le plus demandé. L'eau est généralement considérée douce lorsque sa concentration en sels dissous ne dépasse pas 1 000 mg/l. (USGS, s. d.b) Les sels présents dans l'eau douce ainsi que leur concentration varient grandement en fonction de la région en raison de caractéristiques géologiques et des activités humaines. Par exemple, des études ont révélés que la concentration totale de matières dissoutes dans l'eau de 36 rivières du Canada sur un échantillon de 41 rivières était de moins de 500 mg/l et que la

concentration totale de matières dissoutes dans l'eau des Grands Lacs variait entre 61 mg/l et 227 mg/l. Les principaux sels ions sont le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, le carbonate, le bicarbonate, le chlorure, le sulfate et le nitrate. (Gouvernement du Canada, 2009)

L'eau douce est généralement utilisée pour répondre aux besoins en eau des différents secteurs, entre autres, à cause de sa facilité de traitement en raison de sa faible teneur en sels. L'eau douce est souvent associée à la cryosphère, aux rivières et aux lacs. Or, ces sources d'eau douce, dites eau de surface, représentent seulement un peu plus de 1 % de l'eau douce disponible. Quant à eux, les lacs et les rivières représentent seulement environ 21,5 % de l'eau douce de surface. Les eaux souterraines représentent quant à elles environ 30 % de l'eau douce disponible, ayant ainsi un rôle important dans le cycle de l'eau et dans le remplissage des réservoirs d'eau de surface. Le reste de l'eau douce, soit environ 70 %, n'est pas disponible pour utilisation dans sa forme actuelle puisqu'elle se trouve dans la cryosphère sous forme de neige, de glace et de pergélisol (69 % de l'eau douce de surface). (USGS, s. d.b).

2.2.3 Répartition des ressources en eau douce

Les ressources en eau douce réfèrent à la quantité d'eau douce disponible dans les sources renouvelables d'eau douce de surface et dans les sources renouvelables d'eau douce souterraine. En théorie, les ressources en eau douce sont renouvelables. Par contre, pour que ce principe soit applicable, il faut qu'une utilisation durable de la ressource en eau douce soit faite. Or, à bien des endroits, la ressource en eau douce est exploitée au-delà de sa capacité de renouvellement. Cela signifie que la vitesse des prélèvements d'eau de la source est plus rapide que la vitesse à laquelle la ressource est capable de se remplir ce qui diminue la quantité d'eau douce renouvelable disponible. Certains facteurs influencent le caractère renouvelable des ressources en eau douce tels que la variation de la demande en eau douce et la modification du cycle de l'eau causée, entre autres, par les changements climatiques. Le rapport entre la vitesse à laquelle l'eau douce de la ressource est utilisée et la vitesse à laquelle la ressource est capable de se remplir en eau douce est un bon indicateur de la vulnérabilité d'une population face aux ressources en eau douce. (UNESCO, 2012)

Ces ressources ne sont pas réparties équitablement dans le monde. Neuf pays se partagent 60 % des ressources mondiales en eau douce laissant le reste du monde se partager 40 % des ressources. Les ressources en eau douce de chaque pays dépendent du climat et des réservoirs en eau douce sur leur territoire. En règle générale, non seulement les pays moins développés ont accès à une moins grande quantité d'eau douce, mais ils ont aussi souvent une plus grande densité de population que les pays développés. Comme l'illustre le tableau 2.3, les pays de l'Asie, les pays de l'Afrique du Nord ainsi que les pays du Moyen-Orient sont les plus défavorisés en matière de quantité d'eau douce disponible dans leur région. (Centre d'information sur l'eau, s. d.; UNESCO, 2012)

Tableau 2.3 Estimation de la répartition mondiale des ressources renouvelables en eau douce
(inspiré de : UNESCO, 2012).

Région	Superficie	Total de l'eau douce renouvelable (B1)	Eau douce renouvelable accessible	Population desservie par les ressources en eau douce renouvelables
	millions de km ²	milliers de km ³ /année (% du ruissellement mondial)	milliers de km ³ /année (% de B1)	milliard de personnes (% de la population mondiale)
Asie	20.9	9.8 (25)	9.3 (95)	2.56 (42)
Ancienne Union Soviétique	21.9	4.0 (10)	1.8 (45)	0.27 (4)
Amérique latine	20.7	13.2 (33)	8.7 (66)	0.43 (7)
Afrique du Nord et Moyen-Orient	11.8	0.25 (1)	0.24 (96)	0.22 (4)
Afrique Subsaharienne	24.3	4.4 (11)	4.1 (93)	0.57 (9)
OCDE	33.8	8.1 (20)	5.6 (69)	0.87 (14)
Total	113	39.6 (100)	29.7 (75)	4.92 (81)

Toutefois, même les pays ayant des ressources en eau douce abondantes peuvent connaître des périodes de pénurie d'eau douce. Les activités humaines et l'augmentation de la demande en eau douce générée par l'augmentation de la population, la production d'énergie, la croissance économique et les habitudes alimentaires créent une grande pression sur la disponibilité de la ressource en eau douce. Elles ont une influence sur le caractère renouvelable des ressources en eau douce puisqu'il dépend grandement de la durabilité de l'utilisation qui est faite des ressources. Aussi, l'ensemble des activités humaines ont un impact sur le climat. Le climat a une influence sur le cycle de l'eau ce qui met une pression supplémentaire sur la quantité d'eau douce disponible. Le cycle de l'eau est aussi influencé par l'utilisation des terres faite par les êtres humains puisque cela a un impact sur la perméabilité de la terre. Si les précipitations sont moindres qu'à l'habitude ou que le sol n'est pas assez perméable pour permettre l'infiltration de l'eau des précipitations, les différentes ressources en eau douce ne pourront pas se remplir. (Centre d'information sur l'eau, s. d.; UNESCO, 2012)

2.3 Utilisation des ressources en eau douce dans le monde

L'utilisation des ressources en eau douce réfère au prélèvement des ressources en eau douce provenant des eaux de surface ou des eaux souterraines. Tandis que la quantité d'eau douce disponible n'augmente pas, les statistiques montrent que la consommation d'eau douce ne cesse d'augmenter depuis les années 1900 comme il est possible de constater à partir de la figure 2.3. Les principales causes sont l'augmentation de la population qui devrait dépasser les 9 milliards de personnes d'ici 2050, la migration des populations ainsi que la croissance économique des pays (UNICEF, 2017).

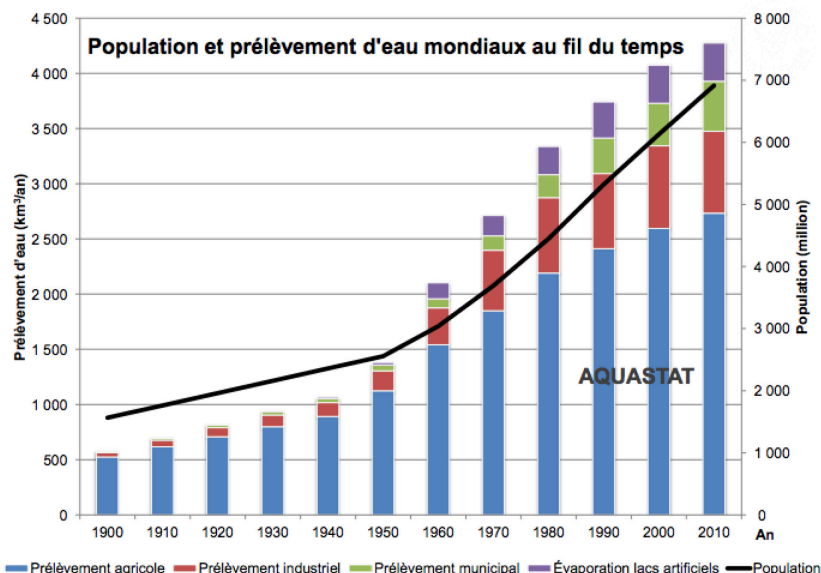


Figure 2.3 Population et prélèvement mondiaux d'eau douce (tiré de : FAO, 2015).

Outre la quantité d'eau nécessaire pour répondre aux besoins de l'environnement, l'utilisation mondiale des ressources en eau douce est séparée en trois catégories principales, soit consommation humaine ou municipale, agriculture et procédés industriels.

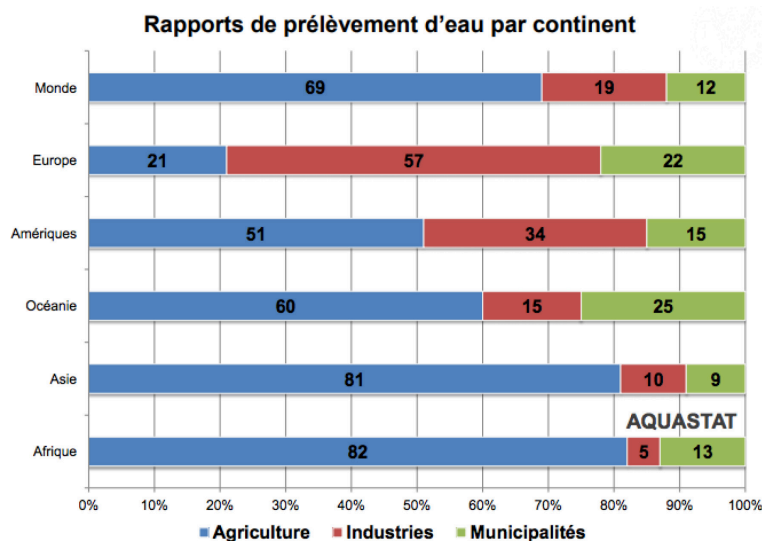


Figure 2.4 Prélèvements de l'eau douce par secteur d'activité et par continent (tiré de : FAO, 2015).

Il est intéressant de constater à partir de la figure 2.4 les différences de consommation entre les secteurs d'activité en fonction du continent. Les sous-sections suivantes donnent un aperçu de l'utilisation de l'eau douce faite par le secteur de l'agriculture, industriel et de la consommation humaine.

2.3.1 Agriculture

Bien que souvent sous-estimée, l'agriculture compte à elle seule pour environ 70 % de la consommation mondiale en eau douce. Le lien entre l'agriculture et l'eau est assez simple : l'eau est essentielle à la vie et donc pour la croissance des cultures et du bétail. La sécurité alimentaire mondiale est donc dépendante de l'accessibilité à des ressources en eau douce. Pour répondre à cette demande, l'eau douce utilisée peut provenir des précipitations pluviales ou de l'irrigation des eaux de surface ou des eaux souterraines. En fonction des différentes cultures, l'eau utilisée pour l'irrigation peut avoir une salinité plus ou moins élevée. (FAO, 2018b) Toutefois, la majorité des cultures nécessitent une eau ayant une concentration en sels dissous plus faible que 7 000 mg/l. (Ladewig et Asquith, 2012)

La quantité d'eau nécessaire pour l'agriculture est affectée par le climat de chaque région. En règle générale, la consommation de l'eau aux fins de l'irrigation augmente avec l'augmentation de la température et elle diminue avec l'augmentation des précipitations. Dans l'ensemble, la proportion de la quantité d'eau utilisée pour l'agriculture par rapport à la quantité d'eau globale utilisée par un pays semble diminuer dans les pays développés. (UNESCO, 2012) Par contre, il semble y avoir une corrélation entre le développement économique d'un pays et ses habitudes alimentaires passant d'une alimentation majoritairement à base de végétaux à une alimentation ayant une proportion plus élevée de viandes (FAO, 2018b). Toutefois, tel qu'il appert de la figure 2.5, l'élevage de bétail demande une grande quantité d'eau douce par rapport à la quantité de viande produire.

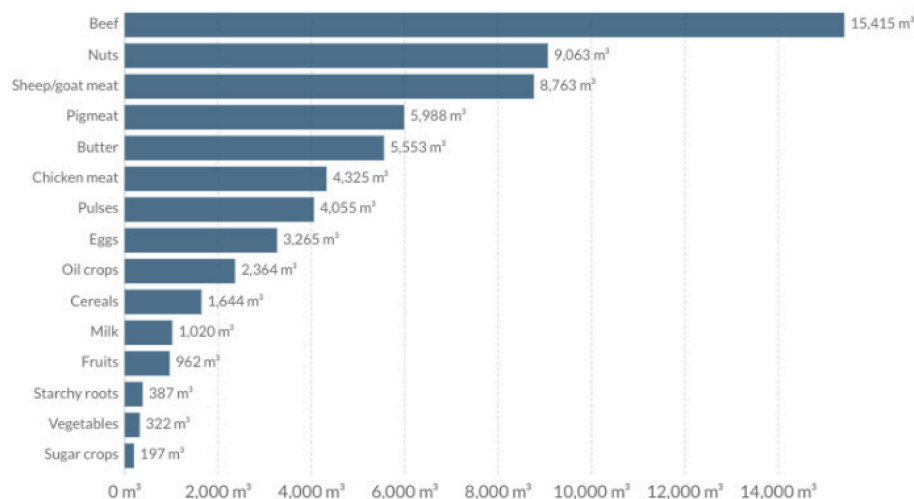


Figure 2.5 Quantité d'eau moyenne en mètre cube (m³) nécessaire à la production d'une tonne de produits alimentaires (tiré de : Ritchie et Roser, 2018).

La population mondiale augmente rapidement tout comme la demande en nourriture et en produits provenant de l'agriculture. D'ici 2050, la population mondiale devrait atteindre plus de 9 milliards de personnes (UNICEF, 2017). L'augmentation de la demande en nourriture implique l'augmentation de la demande en eau douce et l'augmentation de la demande en énergie. Toute forme d'agriculture nécessite

une grande quantité d'eau douce, particulièrement la production de bétail dont la demande est justement en hausse. Pour faire face à l'augmentation de la demande et à la diminution des ressources disponibles, il est nécessaire de modifier les habitudes de consommation ainsi que les techniques d'agriculture dans le but d'optimiser le rapport entre la quantité de nourriture produite et la quantité d'eau nécessaire. (FAO, 2018b)

2.3.2 Consommation humaine

La catégorie consommation humaine inclut l'usage de l'eau douce à des fins domestiques et aux fins de services publics. Cette catégorie peut aussi porter le nom de consommation municipale. Elle inclut l'eau utilisée au quotidien, entre autres, pour boire, cuisiner et se laver. Elle représente environ 10 % de la quantité totale d'eau douce utilisée mondialement. (Ritchie et Roser, 2018)

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime que chaque personne a besoin d'environ 20 à 50 litres d'eau douce par jour, soit environ 0,02 m³ à 0,05 m³ d'eau par jour, pour répondre à ses besoins fondamentaux d'hydratation et d'hygiène personnelle. L'OMS considère qu'au-delà de 100 litres d'eau douce par jour, soit environ 0,1 m³ d'eau par jour, une personne vit dans une situation de confort. (Organisation mondiale de la santé [OMS], 2019)

À l'international, l'OMS produit des recommandations quant à la qualité pour l'eau de boisson afin de s'assurer de la qualité de l'eau disponible pour la consommation humaine. Les critères relatifs au caractère potable de l'eau sont séparés en quatre catégories, soit l'aspect microbiologique, l'aspect chimique, l'aspect radiologique et l'aspect relatif à l'acceptabilité. Il n'y a pas de lignes directrices quant à la concentration en matières dissoutes totales, incluant les sels dissous, maximale dans l'eau par rapport à la santé humaine puisqu'aucune donnée fiable n'est disponible. Toutefois, pour des aspects d'acceptabilité, notamment de goût et d'apparence, l'OMS considère que l'eau ayant une concentration en matières dissoutes totales en dessous de 600 mg/l a une bonne sapidité tandis qu'elle devient progressivement inacceptable lorsqu'elle dépasse 1 000 mg/l. (OMS, 2017) Par contre, une eau ayant une concentration très faible en matières dissoutes totales peut être considérée ayant une mauvaise sapidité à cause de son goût plat et insipide (Gouvernement du Canada, 2009).

2.3.3 Procédés industriels

L'eau douce est aussi indispensable à plusieurs procédés industriels, notamment dans la production d'énergie fossile et nucléaire. Les États-Unis sont le pays qui consomme la plus grande quantité d'eau douce à des fins industrielles, soit plus de 300 milliards m³ d'eau douce par année loin devant la Chine qui est en deuxième place avec une consommation d'environ 140 milliards m³ d'eau douce par année. Excluant ces deux grands consommateurs, la moyenne mondiale annuelle de consommation d'eau douce à des fins industrielles est d'environ 1 milliard m³. (Ritchie et Roser, 2018)

Mondialement, environ 20 % de la consommation totale en eau douce est utilisée par les procédés industriels. La moyenne de consommation varie généralement en fonction du revenu moyen du pays passant d'une consommation représentant moins de 5 % de la consommation d'eau douce d'un pays à plus de 40 %. Effectivement, les pays plus riches ont tendance à utiliser une plus grande quantité d'eau douce pour leurs procédés industriels que les pays en développement. Par exemple, 80 % de la consommation totale d'eau douce en Belgique est associée aux procédés industriels. La crise de l'eau représente un risque pour plusieurs industries qui requièrent une assurance de stabilité par rapport à la quantité d'eau douce disponible en temps donné. (UNESCO, 2012) Toutefois, contrairement à la qualité de l'eau nécessaire pour la consommation humaine, la qualité de l'eau utilisée pour le procédé industriel peut varier selon l'usage spécifique.

2.4 La crise de l'eau : quand la demande est plus grande que la disponibilité

D'ici 2050, la demande en eau douce devrait augmenter d'environ 20 % à 30 % par rapport à la demande actuelle (UNICEF, 2017). Cette augmentation d'environ 1 % par année est principalement justifiée par l'augmentation de la population qui est d'environ 80 millions de personnes par année, par la hausse de la demande en eau des pays en développement et des économies émergentes qui voient leurs habitudes de consommation changer afin de tendre vers les modes de vie des pays développés ainsi que par les changements climatiques. Par conséquent, la disponibilité mondiale d'eau douce par habitant par an a drastiquement diminué depuis les années 1950 variant d'environ 17 000 m³ par personne par an à moins de 7 500 m³ par personne par an dans les années 2000. D'ici 2025, ce nombre devrait diminuer à moins de 5 100 m³ d'eau par personne par an. (Centre d'information sur l'eau, s.d.) L'Organisation mondiale de la santé considère qu'une personne a besoin d'au moins 500 m³ d'eau par an pour répondre à ses besoins de base, soit environ 500 000 litres d'eau (OMS, 2019).

En 2019, le WWAP publiait son *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2019 : ne laisser personne pour compte* statuant que plus de 4 milliards de personnes vivent dans un pays en situation de pénurie d'eau au moins un mois par année tandis que 2 milliards de personnes vivent dans un pays soumis à un stress hydrique élevé, soit plus de 50 % de la population mondiale (UNESCO, 2019a).

2.4.1 Définition de stress hydrique

Le stress hydrique est un concept qui permet d'évaluer le niveau d'exposition d'un pays ou d'un territoire à un risque de pénurie d'eau douce. Selon l'ONU, « [il] se définit comme la proportion de prélèvements d'eau par l'ensemble des secteurs d'activité, par rapport aux ressources en eau disponibles ». (FAO, 2018a) Le stress hydrique peut être calculé en termes de stress hydrique économique ou en termes de stress hydrique physique. D'une part, le stress hydrique économique fait référence à la quantité d'eau disponible ainsi qu'à la croissance socio-économique d'une région. Ce type de mesure est d'une plus grande utilité dans les régions en développement où la demande en eau est susceptible d'augmenter grandement en raison de la

croissance du pays. Généralement, il y a une situation de stress hydrique économique lorsque les infrastructures nécessaires afin d'exploiter les ressources en eau douce ne sont pas disponibles ou lorsqu'il y a une mauvaise gestion des ressources. C'est, entre autres, le cas en Afrique subsaharienne qui dispose de ressources en eau douce qui ne sont pas accessibles pour des raisons économiques. (UNESCO, 2012) D'autre part, le stress hydrique physique fait référence à la quantité totale d'eau douce prélevée, incluant la quantité d'eau nécessaire pour répondre aux besoins en eau de l'environnement, par rapport à la quantité totale d'eau douce renouvelable disponible. Certaines méthodes de calcul incluent la quantité d'eau issue de sources alternatives comme l'eau recyclée et l'eau dessalée. (FAO, 2018a) Dans le cadre de cet essai, le terme stress hydrique fait référence au stress hydrique physique à moins d'indication contraire.

Généralement, le stress hydrique physique est mesuré d'après le rapport entre la quantité totale d'eau douce prélevée et la quantité totale d'eau douce renouvelable disponible sur un territoire et une période de temps déterminé. Ce rapport est exprimé en pourcentage. Lorsque le rapport est plus haut que 100 % cela signifie que la vitesse d'exploitation de la réserve d'eau dépasse la vitesse à laquelle elle peut se renouveler. Dans un tel cas, le risque de pénurie augmente grandement puisque la source ne sera pas capable de se renouveler automatiquement et peut, à long terme, engendrer l'assèchement de la source. (Ritchie et Roser, 2018; UNESCO, 2019a) Le stress hydrique physique peut aussi être mesuré en fonction de la quantité d'eau disponible par personne annuellement sur un territoire donné (FAO, 2014). Le tableau 2.4 fait état des différents niveaux de stress hydrique en fonction de ces deux méthodes de mesure.

Tableau 2.4 Niveaux de stress hydrique (compilation d'après : FAO, 2014; Luo, Young et Reig, 2015).

Niveau de stress hydrique (faible, faible moyen, moyen élevé, élevé, très élevé)	Rapport entre la quantité totale d'eau douce prélevée et la quantité totale d'eau douce renouvelable disponible (%)	Quantité d'eau douce disponible par personne annuellement (m ³ /an)
Faible	< 10	> 1700
Faible – moyen	10 – 20	
Moyen – élevé	20 – 40	Entre 1000 et 1700
Élevé	40 – 80	Entre 500 et 1000
Très élevé	> 80	< 500

Il est à noter que le stress hydrique physique prend seulement en compte la quantité d'eau douce disponible. Cette mesure ne tient pas compte de la qualité de l'eau douce disponible ni de l'accessibilité de la population à l'eau. (UNESCO, 2019a)

2.4.2 État actuel du stress hydrique

En 2014, environ 80 % de la population mondiale vivait dans une situation d'insécurité face aux ressources en eau douce (GIEC, 2014a). Ce chiffre devrait augmenter au courant des prochaines années avec les changements climatiques, l'augmentation de la demande et l'utilisation non durable des ressources en eau qui ne vont qu'exacerber la crise de l'eau (FAO, 2018; UNESCO, 2019b). D'ailleurs, en 2018, 2 milliards de

personnes, réparties dans 86 pays, vivaient en situation de stress hydrique moyen à très élevé (FAO, 2018a). La figure 2.6 illustre que ces personnes sont réparties sur divers continents.

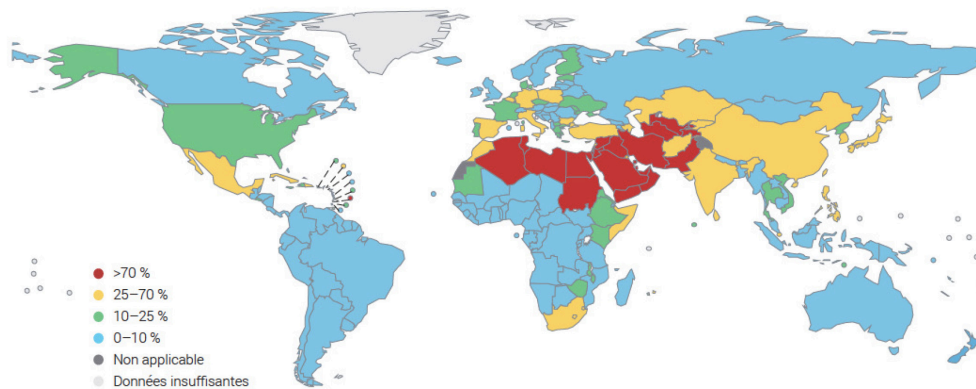


Figure 2.6 Niveaux de stress hydrique physique par pays (tiré de : UNESCO, 2019a).

Le taux moyen du stress hydrique mondial est d'environ 12,8 % ce qui représente une situation de stress hydrique faible à moyen. Toutefois, de grandes variations nationales et régionales font en sorte que certaines régions font face à un stress hydrique élevé ou très élevé. Il peut être trompeur de se fier à l'indicateur de stress hydrique national puisqu'il peut cacher de grandes disparités régionales. C'est, entre autres, le cas du Pérou qui a un indicateur de stress hydrique à 3 %. Toutefois, la région du bassin pacifique indique un stress hydrique moyen à élevé avec un taux de 52 %. (FAO, 2018a)

Les populations vivant en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et en Asie centrale sont les plus exposées face à la crise de l'eau avec un total de vingt pays étant dans une situation de stress hydrique très élevée. Sur ces vingt pays, quinze pays ont un indicateur de stress hydrique de 100 % ou plus, dont quatre pays ont un indicateur de plus de 1000 %, soit l'Arabie Saoudite, les Émirats arabes unis, le Koweït et la Libye. Ces régions du monde utilisent les technologies de dessalement afin de produire de l'eau douce pour combler leur demande pour la consommation humaine. (FAO, 2018a; UNESCO, 2019a) La rareté de l'eau oblige la population à migrer lorsque les pénuries sont trop fréquentes et que la quantité d'eau disponible ne permet pas d'assurer la survie des populations. L'accès à l'eau lors des migrations est aussi un enjeu dans ces régions. Les prévisions pour 2025 vont dans le même sens. Ces phénomènes ne vont que s'accroître avec les changements climatiques et la croissance démographique. (UNESCO, 2019a) La région de l'Afrique subsaharienne n'est pas considérée comme étant en situation de stress hydrique puisqu'une quantité suffisante d'eau douce par personne est disponible. Toutefois, plus d'un tiers de la population africaine est exposée à des sécheresses, principalement en Afrique de l'Est, en Afrique du Sud et en Afrique du Nord-Ouest. La situation générale de l'Afrique subsaharienne face à la ressource en eau reste donc précaire et plusieurs pays vivent des situations de pénurie périodique et chronique ce qui freine le développement de l'Afrique. L'agriculture étant au centre de l'économie de plusieurs pays, les pratiques d'irrigation non durable

contribuent à l'appauvrissement des ressources en eau douce souterraine et donc à l'augmentation du stress hydrique du continent. Par exemple, huit aquifères majeurs d'Afrique ne sont pas capables de se recharger en raison de la quantité d'eau douce prélevée qui est haut delà de la vitesse de recharge. (UNESCO, 2019a)

Quant à elle, une grande partie des régions de l'Asie et du Pacifique vivent un stress hydrique modéré à élevé selon la région en raison de la disparité de la distribution spatiale des ressources en eau douce sur ce continent. À titre d'exemple, en 2016, plus de 60 % des pays de la région vivaient en situation d'insécurité hydrique. La pollution des cours d'eau ainsi que l'utilisation non durable des ressources en eau douce souterraine principalement reliée à l'irrigation aux fins de l'agriculture n'aident pas la situation déjà précaire de la région. Notamment, sept des quinze pays qui prélèvent la plus grande quantité d'eau douce de sources souterraines mondialement se trouvent dans ces régions. Malgré la résilience des populations face au stress hydrique, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles rend difficile leur adaptation face aux changements. Cette région est la plus vulnérable aux catastrophes naturelles en raison de sa position géographique. Ces phénomènes s'intensifient avec les changements climatiques et rendent particulièrement vulnérable les populations vivant en zones côtières d'Asie et du Pacifique où les ressources en eau douce sont d'autant plus précaires et limitées. (UNESCO, 2019a)

L'Amérique du Nord et l'Europe regroupent les pays les plus développés du monde. Or, malgré cela, plus de 21 millions de personnes vivant dans ces régions n'ont toujours pas accès à des services d'eau potable de base. Le sud-ouest des États-Unis, le nord du Mexique ainsi que l'Europe de l'Est font face à un enjeu d'accessibilité inéquitable aux ressources en eau douce. (UNESCO, 2019b) Quant à eux, les régions de l'Amérique latine et des Caraïbes reconnaissent depuis longtemps l'importance d'une bonne gestion des ressources en eau douce. Pour cette raison, la grande majorité des pays ne vivent aucun stress hydrique pour l'instant ou utilisent une stratégie de gestion de l'eau qui intègre le dessalement de l'eau pour combler leurs besoins comme c'est le cas des Barbades. (Jones et al, 2019; UNESCO, 2019b)

Bref, même si 44 pays d'Europe ont réussi à réduire le stress hydrique auquel faisait face leur population en adoptant des méthodes de gestion durable des ressources, il est probable que le stress hydrique augmente à mesure que les ressources en eau douce diminuent en raison de l'augmentation de la demande en eau, de l'utilisation non durable des ressources en eau et de l'intensification des changements climatiques (FAO, 2018a). Les études prédisent que d'ici 2025 environ 63 % de la population mondiale sera en situation de stress hydrique ou en situation de pénurie d'eau ce qui ne fait qu'augmenter les risques de pauvreté et d'inégalité (Centre d'information sur l'eau, s. d.; UNESCO, 2019b). D'ailleurs, les données montrent qu'entre 1996 et 2016 ces facteurs ont mené à l'accentuation du stress hydrique dans 26 pays. Il a notamment plus que doublé dans 15 pays d'Afrique. (FAO, 2018a) Le prochain chapitre établira le lien entre les changements climatiques et la crise de l'eau.

3 CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET RESSOURCES EN EAU DOUCE

L'utilisation non durable des ressources est la cause principale du stress hydrique. Certaines activités humaines ont un impact significatif sur les ressources en eau douce, par exemple l'utilisation des terres, les modifications dans la morphologie des rivières et des nappes phréatiques, la construction et l'exploitation de centrales hydroélectriques et de centrales thermiques, la construction de barrages et de digues, le drainage des milieux humides ainsi que l'irrigation. Quant à eux, les changements climatiques posent une pression supplémentaire sur les ressources en eau douce. (GIEC, 2019)

Le réchauffement planétaire se transpose par l'augmentation des températures moyennes de l'air et des océans, de la fonte de la neige et de la glace ainsi que par l'élévation du niveau de la mer (GIEC, 2019). Ces changements climatiques augmentent la fréquence et l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes ce qui donne naissance à des catastrophes naturelles. Or, pas moins de 90 % des catastrophes naturelles sont liées à l'eau, dont 43 % sont des inondations et 5 % sont des sécheresses. Ces deux phénomènes ont des conséquences sur les ressources en eau douce. Non seulement ils contribuent à réduire la masse d'eau douce disponible, ils peuvent endommager les accès à l'eau douce ainsi que contaminer les sources d'eau douce la rendant ainsi inadéquate à la consommation humaine et encourageant la propagation de maladies. Ces répercussions ont des conséquences et des coûts économiques et sociaux importants. (UNESCO, 2019a)

L'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) considère que les effets des changements climatiques peuvent accentuer la crise de l'eau et les inégalités puisqu'ils ont des impacts sur la quantité de l'eau douce disponible, la qualité de l'eau douce ainsi que sur l'accessibilité aux ressources (UNESCO, 2019a). Ces effets sont ressentis principalement de façon régionale en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque territoire (GIEC, 2019). Dans les régions gravement affectées par le stress hydrique, les changements climatiques ont des conséquences désastreuses puisqu'ils menacent de contaminer ou d'assécher les réserves en eau douce. De plus, la pression des changements climatiques sur la crise de l'eau est accentuée par des facteurs socioculturels, socio-économiques et politiques. (UNESCO, 2019) Par exemple, à cause des conséquences des changements climatiques sur les ressources en eau, des femmes doivent marcher plus loin pour aller chercher l'eau nécessaire pour répondre aux besoins de leur communauté (WEF, 2019). Le chapitre trois couvrira plus en profondeur la relation entre les changements climatiques et la crise de l'eau en étudiant les impacts des changements climatiques sur le cycle de l'eau ainsi que les zones vulnérables.

3.1 Impacts des changements climatiques sur le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est vulnérable aux variations de la température atmosphérique qui sont accentuées par le bilan radiatif. Les modèles climatiques prédisent avec certitude l'augmentation de la température dans presque toutes les régions du monde. La relation entre l'augmentation des températures et les conséquences sur les ressources en eau douce est directe. (GIEC, 2018) Le GIEC affirme qu'une partie des changements observés dans le cycle de l'eau sont liés au réchauffement climatique, les autres facteurs

étant les variations naturelles et la conséquence des activités humaines. Les facteurs climatiques ayant le plus d'impacts sur les ressources en eau douce sont les précipitations, la température et l'évapotranspiration. La variation de ces facteurs climatiques aura pour effet d'accélérer le cycle de l'eau dans plusieurs régions du globe. Cela aura, entre autres, un impact sur la fréquence et l'intensité des précipitations, la fonte de la neige et des glaces, l'augmentation de l'évapotranspiration et de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, la variation du taux d'humidité du sol et du taux d'infiltration de l'eau ainsi que sur le ruissellement. (GIEC, 2013) Dans son 5^e rapport, le GIEC confirme avec un degré de confiance moyen l'influence des précipitations et de la fonte de la cryosphère sur le cycle de l'eau ainsi que sur la quantité et la qualité des ressources en eau. (GIEC, 2014a)

Toutefois, il est difficile de faire des prédictions à long terme par rapport aux retombées concrètes des changements climatiques sur le cycle de l'eau en raison de la variabilité naturelle du cycle de l'eau, du manque de données temporelles disponibles et de l'impact des activités humaines, comme l'illustre la figure 3.1 (GIEC, 2014a).

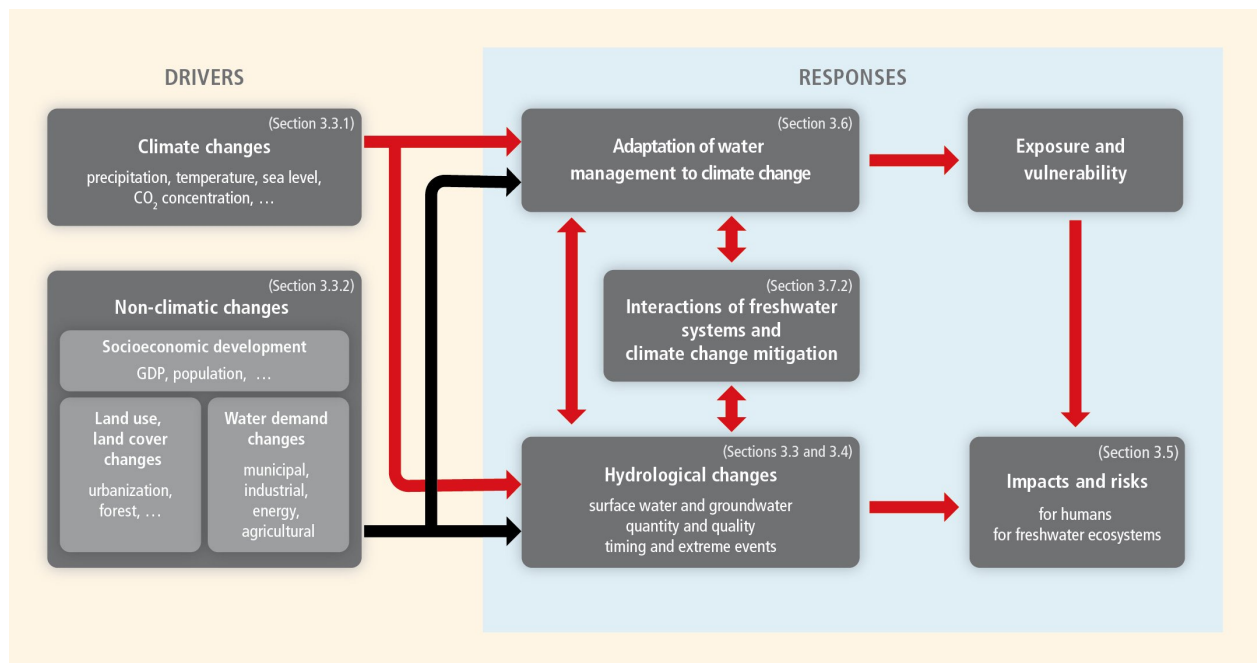


Figure 3.1 Impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur le cycle de l'eau (tiré de : GIEC, 2014a).

Or, il est tout de même possible de dégager des tendances significatives à partir des données disponibles. Les sous-sections suivantes donneront un aperçu des impacts des changements climatiques sur le cycle de l'eau, précisément de l'impact des variations dans les précipitations et dans l'évapotranspiration, des modifications dans la cryosphère ainsi que dans le ruissellement et le débit fluvial.

3.1.1 Précipitation et évapotranspiration

L'augmentation de la température a comme effet d'accélérer le cycle de l'eau. Cela peut avoir un impact considérable sur la variation des précipitations observées mondialement ainsi que sur l'évapotranspiration. En effet, la hausse de la température atmosphérique a pour effet d'augmenter la capacité de rétention d'eau de l'atmosphère sans qu'il ait de changements majeurs dans le taux d'humidité relative. Cela aura pour effet d'augmenter le taux d'évaporation sur une bonne partie des surfaces aquatiques. Quant à elle, il y a de très fortes chances que l'évapotranspiration sur la surface terrestre augmente dans un climat plus chaud. L'évapotranspiration a un effet sur l'humidité du sol, le ruissellement, la quantité d'eau dans les réservoirs ainsi que sur le niveau de salinité des aquifères. (GIEC, 2014b) Comme l'illustre la figure 3.2, plusieurs disparités sont présentes entre les régions quant à la variation prévisible des précipitations annuelles entre 2010 et 2050.

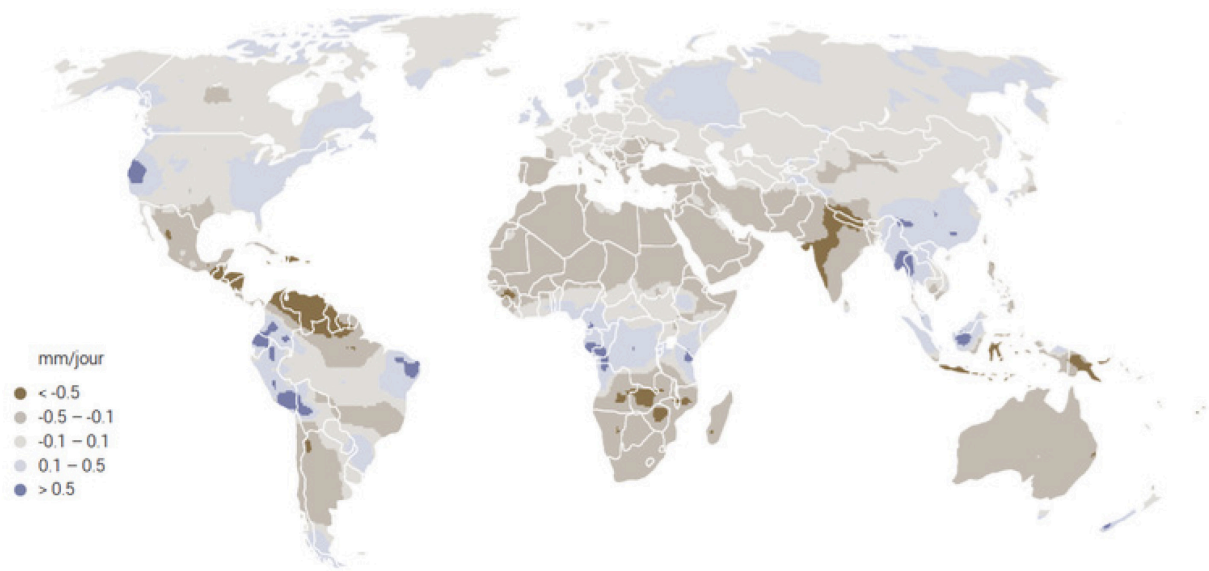


Figure 3.2 Variation des précipitations nettes, 2010 – 2050 (tiré de : UNESCO, 2019a).

Le GIEC confirme avec un degré de confiance élevé que les précipitations sont en hausse dans l'hémisphère nord, dans les régions en haute latitude, dans l'océan Pacifique équatorial ainsi que dans une partie des régions humides, notamment les régions humides situées en moyennes latitudes. De plus, il est très probable que l'occurrence et l'intensité des épisodes de fortes précipitations augmentent au même rythme que l'augmentation des températures, et ce, principalement dans les régions en moyennes latitudes et dans les régions tropicales humides, en particulier au Canada, en Russie, en Afrique de l'Est, au nord de l'Asie centrale et dans les régions amazoniennes. Ces phénomènes sont caractérisés par des précipitations extrêmes provoquant un ruissellement élevé entrecoupé par des périodes sèches avec un haut taux d'évapotranspiration. (GIEC, 2014a)

Par contre, l'augmentation des précipitations extrêmes ne signifie pas une plus grande quantité totale annuelle de précipitations. En effet, les précipitations sont plus condensées, mais elles n'augmentent pas la quantité totale des précipitations reçues. (GIEC, 2014a) Notamment, la plupart des régions tropicales et des régions situées en moyennes et hautes latitudes verront leurs précipitations extrêmes augmenter plus que la moyenne des précipitations. La moyenne annuelle des précipitations va probablement diminuer dans les régions en moyennes latitudes et dans les régions subtropicales arides. (GIEC, 2014a) La variation des précipitations joue un rôle important sur la disponibilité des ressources en eau douce (UNESCO, 2012).

Les changements climatiques devraient modifier la fréquence et l'intensité des inondations et des sécheresses de façon inégale à travers le monde. Les études prévoient que plus de la moitié des régions du monde verront l'occurrence des inondations augmenter, en particulier aux États-Unis, en Asie et en Europe tandis que l'Afrique devrait voir ses risques d'inondation diminuer. (GIEC, 2014b; GIEC, 2018)

Ironiquement, l'augmentation des épisodes de précipitations extrêmes et d'inondations est reliée à l'augmentation du risque de sécheresses. Durant le 21^e siècle, les périodes de sécheresse et leur intensité devraient augmenter dans les régions arides. Cela aura un impact sur le stress hydrique dans ces régions. (GIEC, 2014b) L'augmentation des sécheresses est due à la diminution des précipitations et à l'augmentation de l'évapotranspiration qui changent les caractéristiques du sol (GIEC, 2018). Une conséquence majeure du changement dans les précipitations est la désertification principalement dans les régions arides, semi-arides et subhumides sèches. La désertification est causée par le manque d'eau dans certaines régions ce qui pousse les sols à s'assécher et à perdre leurs propriétés. (Coalition eau, 2014)

3.1.2 La cryosphère

La cryosphère représente une grande réserve d'eau douce sur Terre, soit près de 70 % de la quantité totale d'eau douce dans les réserves sur les terres émergées. La cryosphère englobe les réserves d'eau douce dans le pergélisol, la neige, la glace terrestre, les glaciers et les calottes glaciaires. Plus de 15 % de la population dépendent des bassins d'eau douce alimentés par la fonte des neiges et de la glace terrestre comme ressource d'eau douce principale. (Coalition eau, 2014) Toutefois, la cryosphère est sensible aux variations climatiques comme la température et les précipitations. Dans la plupart des régions, l'augmentation de la température causée par le réchauffement climatique devrait causer la diminution de la quantité de neige reçue en hiver, l'accélération de la fonte de la neige en été et la diminution de la quantité de neige au sol. Dans la plupart des régions de l'hémisphère nord, la période de chute de neige raccourcit et la période de fonte commence plus tôt ce qui provoque une diminution des précipitations sous forme de neige. Les données disponibles montrent que la cryosphère a globalement diminué de volume durant la dernière décennie. (GIEC, 2019)

Le même phénomène s'applique aux glaciers et aux calottes glaciaires. Dans plusieurs régions, la masse des glaciers diminue. En effet, la diminution du volume d'eau sous forme de glace est attribuable à l'augmentation des températures qui engendre la fonte des glaces en été qui est plus importante que les

précipitations reçues en hiver. La fonte accélérée de la cryosphère pourrait provoquer l'élévation du niveau de la mer. (GIEC, 2019) La majorité des scénarios climatiques prédisent de façon très probable que le rythme de l'élévation du niveau de la mer accélérera durant le 21^e siècle, et ce, de façon inégale à travers le monde. Cette élévation du niveau de la mer aura des conséquences autant sur la perte de littoraux que sur les zones inondées principalement dans les basses terres, les deltas et les îles à basse altitude. (GIEC, 2018; GIEC, 2019)

3.1.3 Ruissellement et débit fluvial

Les variations dans la quantité et la forme des précipitations, dans la quantité d'eau sous forme solide dans la cryosphère ainsi que dans le taux d'évaporation ont un effet sur le ruissellement et le débit fluvial. En général, les variations des précipitations concordent avec les variations dans le débit des rivières. (GIEC, 2019) Les données recueillies par le GIEC montrent une corrélation entre les changements physiques constatés dans le ruissellement et le débit fluvial et les changements climatiques (GIEC, 2018). Cela permet de prédire une variation dans le débit moyen d'un grand nombre de rivières autour du monde dû aux changements climatiques. Entre autres, les régions en haute altitude voient leurs précipitations et le débit des rivières sur leur territoire augmenter jusqu'à l'atteinte de leur plus haut débit, le débit de pointe. À court terme, l'augmentation des températures qui a pour effet d'accélérer la fonte des glaces ainsi que d'allonger la période de fonte engendre l'augmentation temporaire du ruissellement et du débit des rivières. (GIEC, 2019) Cette augmentation du ruissellement sera seulement profitable si les régions sont adéquatement outillées pour le captage et l'entreposage de cette eau douce supplémentaire. Autrement, l'eau supplémentaire rejoindra ultimement les plans d'eau salés. Un autre défi à relever sera de s'adapter aux variations temporelles des débits en raison des modifications dans les saisons.

Les études montrent que cette augmentation du ruissellement diminuera graduellement au courant du prochain siècle en fonction de la fonte des glaciers (GIEC, 2019). À long terme, la diminution des précipitations sous forme de neige ainsi que l'accélération de la fonte des glaciers auront pour conséquence de diminuer le volume d'eau sous forme solide dans les glaciers puisque la réserve n'est plus capable de se renouveler naturellement. Cela aura un impact sur le ruissellement et donc sur le débit fluvial ainsi que sur la quantité d'eau douce disponible dans les différents bassins. (Coalition eau, 2014) Des évidences probantes suggèrent que les rivières alimentées par des glaciers dans plusieurs régions ont déjà connu leur débit de pointe. C'est, entre autres, le cas de l'ouest du Canada, des Alpes suisses et des Andes en basse altitude. Plusieurs régions sont aussi vulnérables aux variations négatives dans les précipitations qui ont une incidence sur le débit fluvial. (GIEC, 2019) La figure 3.3. présente la prévision des variations du ruissellement et de l'humidité du sol à l'horizon 2081.

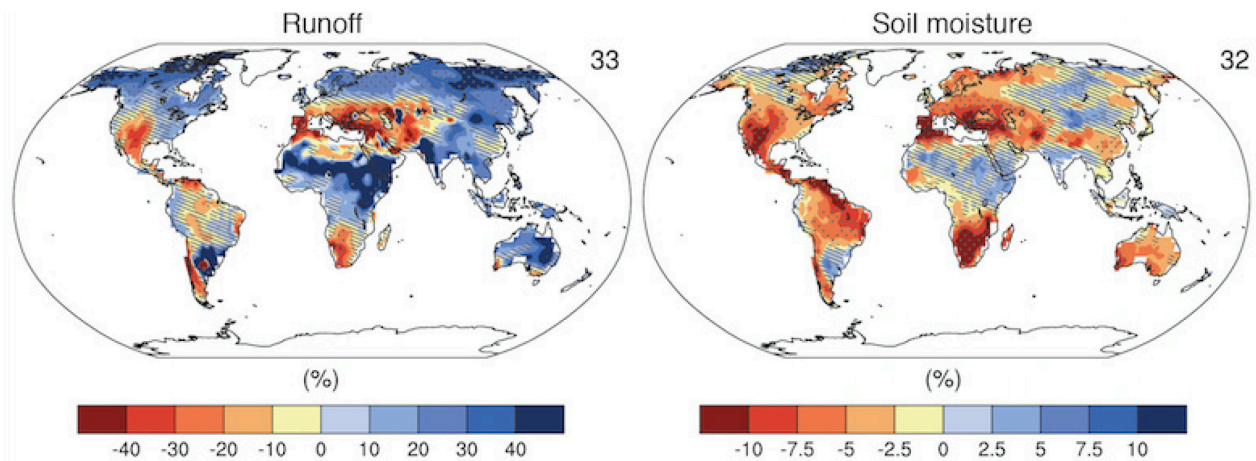


Figure 3.3 Prévision des variations du ruissellement annuel et de l'humidité du sol d'ici 2081-2100
(tiré de : GIEC, 2013).

3.2 Impacts des variations du cycle de l'eau sur les ressources en eau douce

Dans son 5  rapport sur les changements climatiques, le GIEC confirme la vulnérabilité des ressources en eau douce face aux changements climatiques en raison de leur incidence sur le cycle de l'eau (GIEC, 2014a). Il est indéniable que les changements climatiques auront un impact négatif sur le nombre de pays touchés par le stress hydrique ainsi que sur l'intensité du stress hydrique. Toutefois, malgré les différentes projections, la portée des conséquences des changements climatiques sur les ressources en eau douce reste incertaine puisqu'elle dépend de plusieurs variables, elles-mêmes incertaines, comme le modèle hydrologique, les précipitations, les émissions de GES, la vulnérabilité d'un climat ou d'une population ainsi que l'étendue et le succès des mesures d'adaptation mises en place. L'incidence des activités humaines sur les ressources en eau rend difficile l'établissement de liens directs entre les changements dans les ressources en eau douce et les changements climatiques. (GIEC, 2018)

Les sous-sections suivantes établiront la corrélation entre les changements climatiques et la crise de l'eau ainsi que l'incidence des variations du cycle de l'eau sur la demande, la qualité, la quantité et l'accessibilité des ressources en eau douce. Pour terminer, la prédiction des zones vulnérables face aux changements climatiques affectant les ressources en eau douce sera déterminée à partir des données disponibles.

3.2.1 Corrélation entre les changements climatiques et la crise de l'eau

Il ressort des résultats du sondage 2018-2019 du Forum économique mondial (WEF) concernant la perception des risques que trois des cinq risques étant considérés comme ayant le plus de chances de se réaliser ainsi que trois des cinq risques dont les impacts potentiels sont perçus comme étant les plus néfastes sont des enjeux environnementaux, soit les  v nements météorologiques extrêmes, l'échec de l'adaptation et de l'atténuation des changements climatiques et les catastrophes naturelles. Quant à elle, la crise de l'eau a été class e en neuvième position des risques ayant le plus de chances de se réaliser et en

quatrième position en matière d'impacts. (WEF, 2019) La figure 3.4 illustre l'interrelation entre les risques mondiaux.

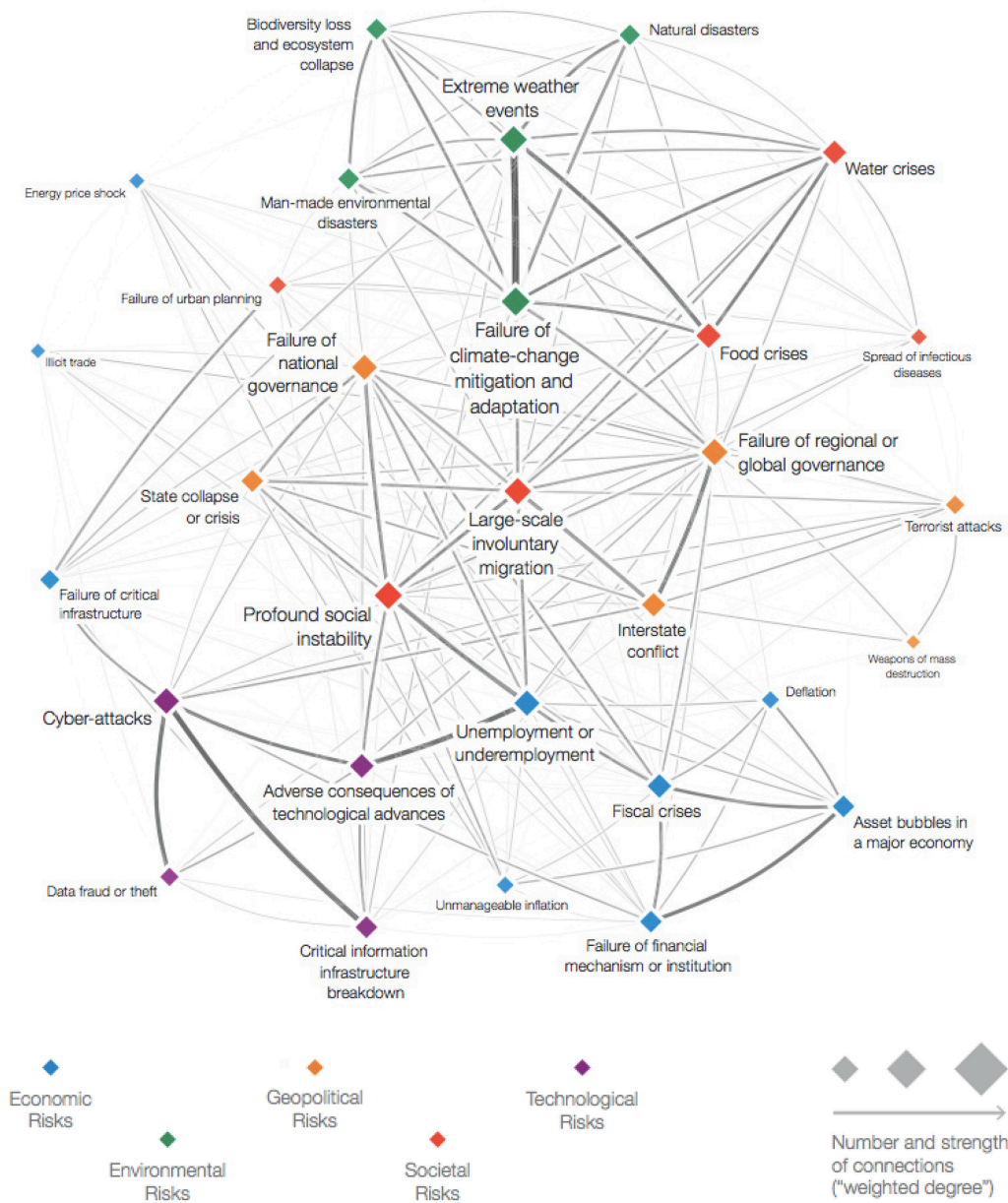


Figure 3.4 Carte des interconnexions entre les risques mondiaux, 2019 (inspiré de : WEF, 2019).

Il est possible de constater les interconnexions entre les changements climatiques, la crise de l'eau et les impacts négatifs face au développement durable mondial, notamment sur la crise de la faim, l'instabilité sociale, la crise migratoire et la santé. Toutefois, l'effet des changements climatiques sur ces différentes variables dépend de l'intensité du réchauffement planétaire. Il est possible de constater par la figure 3.5 qu'entre 1 500 et 2 000 millions de personnes risquent d'être exposées à une augmentation du stress hydrique à cause des changements climatiques (OCDE, 2017).

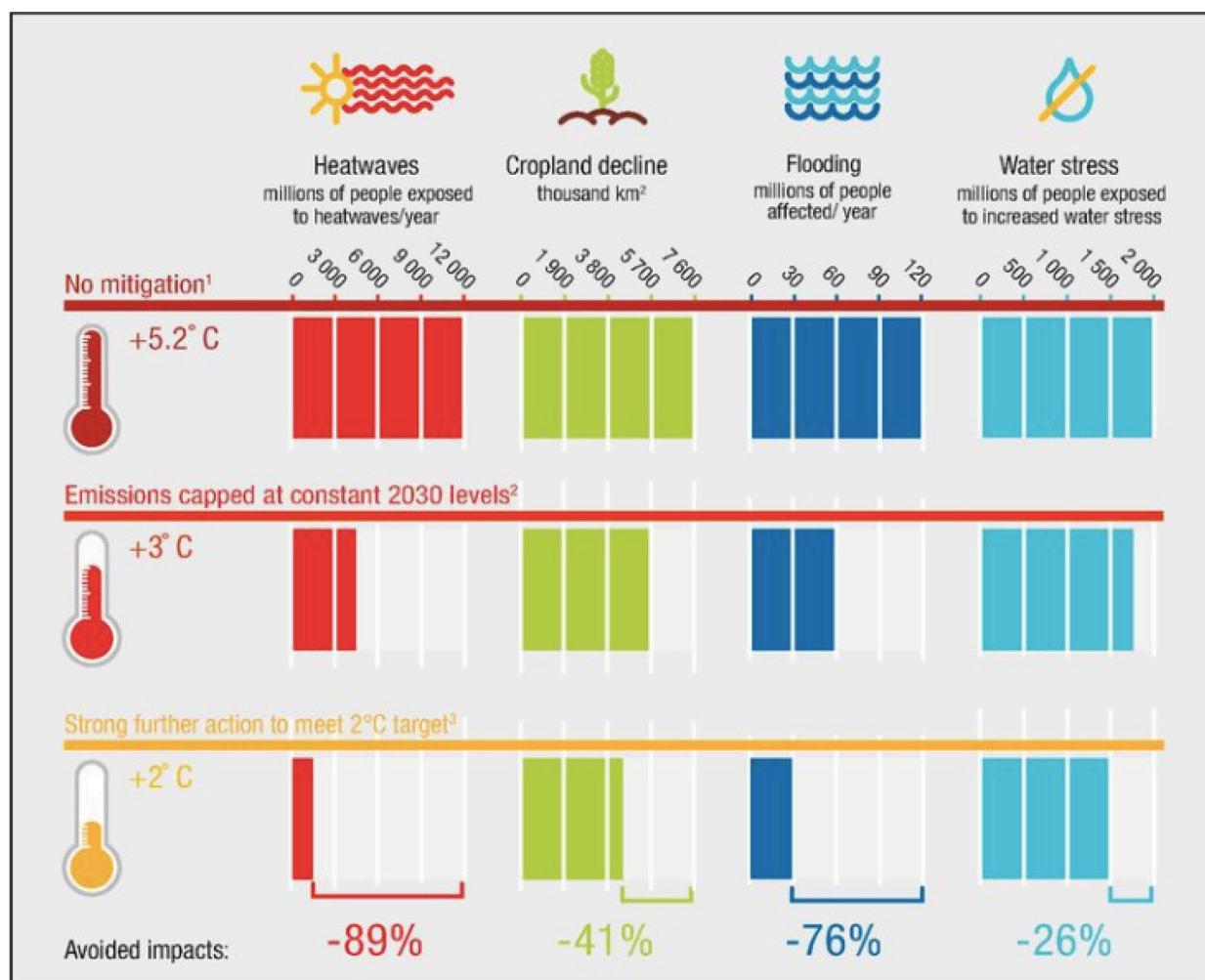


Figure 3.5 Impacts de l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe (tiré de: OCDE, 2017).

Selon les projections du GIEC, l'augmentation de la population exercera une pression plus intense sur les ressources en eau douce que les changements climatiques si le réchauffement planétaire est limité à moins de 2 °C par rapport à 1990. (GIEC, 2018) Par contre, tout degré supplémentaire au-delà de 2 °C aura pour effet de réduire les ressources en eau douce renouvelables pour au moins 7 % de la population mondiale d'au moins 20 % supplémentaire (GIEC, 2014a).

3.2.2 Demande en eau douce

La variation des températures et des précipitations participe à accentuer la crise de l'eau. Ces facteurs influencent la demande en eau et augmentent la concurrence entre les différents secteurs de consommation pour avoir accès à la ressource en eau douce. (GIEC, 2014b) Notamment, les changements climatiques auront un effet sur la demande en eau pour l'agriculture. Pour les systèmes utilisant l'irrigation, les différentes études s'entendent pour dire que la demande en eau va augmenter sur l'ensemble de la planète, particulièrement en Asie, en Europe et aux États-Unis. En effet, la variation des facteurs climatiques aura

pour conséquence d'augmenter la quantité d'eau nécessaire pour produire une quantité donnée de nourriture dans plusieurs régions. Par contre, il est possible que l'augmentation de la quantité d'eau nécessaire soit partiellement compensée par la diminution de la quantité d'eau nécessaire à la croissance des végétaux en raison de l'effet CO₂. (GIEC, 2014c)

De plus, la demande en eau douce pour fins de consommation humaine risque aussi d'augmenter avec l'augmentation de la température. Toutefois, plusieurs facteurs auront un impact sur la quantité d'eau douce disponible et sur la qualité de l'eau douce ce qui créera un nouveau défi d'approvisionnement en eau douce de qualité. (GIEC, 2014c)

3.2.3 Qualité d'eau douce disponible

L'augmentation générale de la température de l'eau causée par le réchauffement planétaire aura pour effet de diminuer globalement la qualité de l'eau douce disponible, notamment en causant l'augmentation de la quantité d'agents pathogènes présents dans l'eau et en encourageant la propagation des bactéries et autres contaminants à une vitesse supérieure. Cela aura des impacts désastreux sur la santé humaine, principalement dans les régions où l'accès à l'assainissement de l'eau n'est pas disponible ou adéquat. De plus, autant les sécheresses que les inondations causent souvent la contamination des réserves d'eau douce. (GIEC, 2018; UNICEF, 2015b)

L'augmentation des épisodes de fortes précipitations jouera aussi un rôle important dans la propagation rapide des agents pathogènes, des coliformes fécaux et des polluants autant vers les réserves d'eau de surface que vers les réserves d'eau souterraine. En effet, l'augmentation du ruissellement a comme effet d'augmenter la charge en nutriments, en sels, en métaux lourds et en agents pathogènes dans les réservoirs et l'augmentation du débit fluvial a pour effet d'augmenter la vitesse de transport de ces polluants. Les études dénotent aussi une augmentation dans la présence de polluants et de coliformes fécaux dans les eaux souterraines après des épisodes de fortes pluies. Quant à elle, la diminution du débit fluvial aura aussi pour conséquence d'augmenter le taux de salinité des lacs, des rivières et des estuaires. La salinité de l'eau aura aussi tendance à augmenter dans les réserves d'eau souterraine peu profondes, particulièrement dans les régions semi-arides et arides où l'évapotranspiration est plus élevée. (GIEC, 2014b) Les inondations d'eau salée causées par l'élévation du niveau de la mer ou par des tempêtes auront aussi pour effet de contaminer les nappes phréatiques situées en zones côtières si ces régions ne sont pas équipées adéquatement pour drainer et évacuer efficacement l'eau des zones inondées. L'eau douce va donc devenir trop salée pour l'usage à laquelle elle est destinée. (UNICEF, 2015a; WEF, 2019)

3.2.4 Quantité d'eau douce disponible

La quantité d'eau douce disponible est influencée par plusieurs facteurs, soit la température, les précipitations, le ruissellement, l'infiltration et l'état des réserves souterraines. Les précipitations alimentent les sources en eau douce par le ruissellement et l'infiltration de l'eau dans le sol. La modification du cycle de l'eau qui engendre une variation des précipitations a un effet direct sur la capacité de renouvellement et

sur la disponibilité des ressources en eau douce. (GIEC, 2014b) Le débit fluvial et le ruissellement sont affectés par la quantité et la forme des précipitations ainsi que par la fonte des glaces et de la neige (GIEC, 2014b). Les variations dans le volume d'eau sous forme solide dans la cryosphère ont un impact négatif sur l'approvisionnement en eau des populations normalement bénéficiaires de cette ressource. Le changement de forme des précipitations ainsi que la fonte accélérée de la neige et de la glace ont pour conséquence d'augmenter le débit fluvial et le ruissellement en hivers et de le diminuer en été (GIEC, 2019). D'une part, la diminution du débit fluvial en été a pour conséquence d'accentuer les sécheresses (GIEC, 2014b). D'autre part, l'augmentation du débit fluvial peut causer des crues et des inondations puisque les infrastructures ne sont pas adéquates pour récolter et pour entreposer l'eau douce issue de la fonte accélérée des glaciers. Cela résulte en la diminution des réserves d'eau douce puisqu'une portion de cette eau douce se retrouve dans les océans et dans les mers et se transforme ainsi en eau salée ce qui a aussi pour effet d'augmenter le niveau de la mer. Sur le long terme, une fois que le débit fluvial a atteint son plus haut point, la quantité d'eau disponible en aval du glacier va diminuer. Les changements dans l'état de la cryosphère ont aussi des répercussions sur le ruissellement. (GIEC, 2019) Les variations dans le ruissellement auront des effets sur le niveau des réserves d'eau douce. Notamment, une élévation des eaux de surface des lacs en Mongolie et en Chine est observée. Elle est attribuée à la fonte accélérée de la cryosphère ainsi qu'aux modifications dans la forme des précipitations. Par contre, plusieurs bassins d'eau douce de surface voient leurs réserves diminuer en raison de l'augmentation des températures, des sécheresses et des activités humaines. La modification dans le débit fluvial aura non seulement un impact sur la consommation humaine, mais aussi sur la production d'hydroélectricité. (GIEC, 2014a)

Bien souvent, les précipitations extrêmes n'aident pas à augmenter les réserves en eau douce. En effet, à la suite de fortes précipitations, le sol atteint souvent sa capacité d'infiltration puisqu'il est saturé. Le même problème s'applique aux réservoirs qui n'ont pas la capacité d'entreposer une aussi grande quantité d'eau. Les fortes précipitations augmentent les risques d'inondation et elles ont aussi comme effet de détruire des écosystèmes, de mettre à risque la vie et la santé humaine ainsi que d'endommager et de détruire des infrastructures, incluant les infrastructures assurant l'accès à l'eau douce. (UNESCO, 2012)

La tendance mondiale est à la diminution des réserves d'eau douce souterraine. Dans un de ces plus récents rapports, le GIEC a conclu, avec un haut degré de confiance, que les changements climatiques auront un impact significatif sur la diminution des ressources en eau douce souterraine dans presque toutes les régions subtropicales sèches. (GIEC, 2019) La figure 3.6 présente les prédictions de quatre modélisations quant aux modifications de la quantité d'eau douce disponible dans les réserves souterraines.

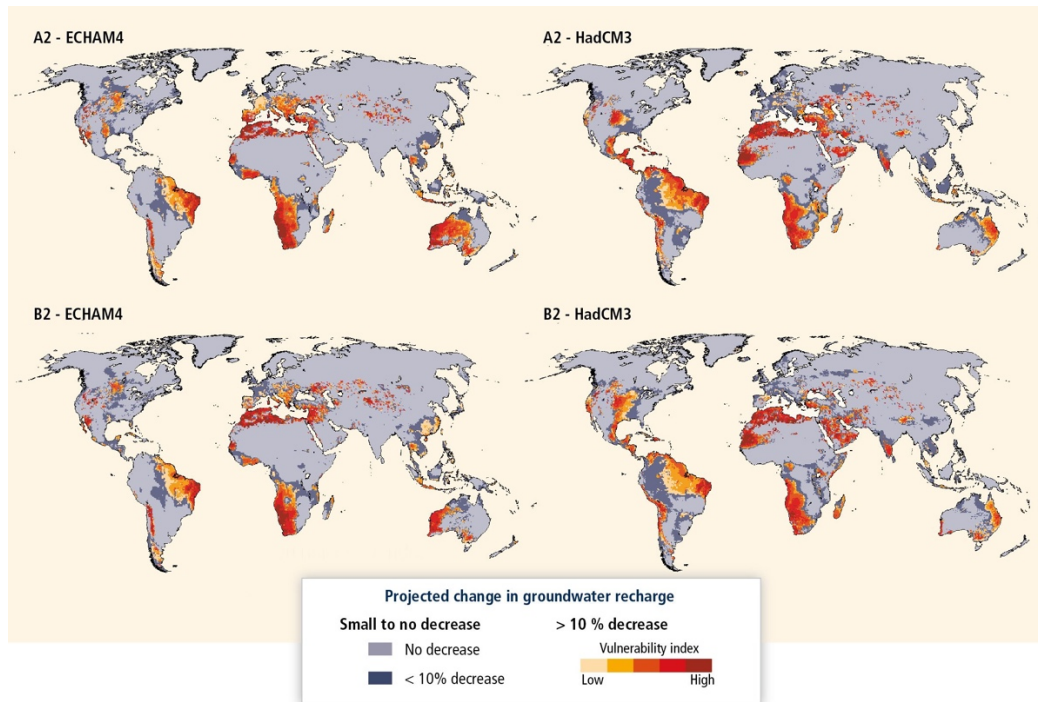


Figure 3.6 Prédiction des modifications dans les réserves d'eau douce souterraine (tiré de : GIEC, 2014a).

Dans certains cas, cette diminution est liée aux changements dans le cycle de l'eau qui cause une diminution de l'alimentation des nappes phréatiques par les eaux de surface et par l'infiltration. Toutefois, dans la plupart des cas, la diminution des réserves d'eau douce souterraine est attribuable en grande partie à l'utilisation humaine au-delà de la capacité de recharge naturelle de la source. (GIEC, 2014b) Les ressources en eau douce souterraine subissent une pression initiale qui pousse les populations à surexploiter les réserves d'eau douce souterraine afin de répondre à la demande en eau douce grandissante. Les eaux souterraines sont souvent considérées comme une source d'eau de secours en cas de pénurie d'eau douce de surface. Les changements climatiques viennent ajouter une pression supplémentaire aux réserves d'eau douce en augmentant les températures moyennes ce qui a pour effet d'augmenter la demande en eau douce et donc la surexploitation des ressources en eau douce souterraine. (Wada et al., 2017) Normalement, les réservoirs d'eau souterraine se remplissent avec l'eau des précipitations qui s'infiltre dans le sol et qui alimente les réserves des eaux de surface et des eaux souterraines. Or, avec la diminution des précipitations et la diminution de l'eau douce de surface disponible, le caractère renouvelable des réservoirs d'eau souterraine est en péril. (UNESCO, 2012) Une étude effectuée sur quatre aquifères situés en Espagne montre l'interaction entre la diminution des réserves d'eau souterraine, la diminution des précipitations et l'augmentation de l'évapotranspiration (Aguilera and Murillo, 2009).

3.2.5 Accessibilité à une ressource en eau douce

Dans bien des situations, le problème se pose à l'égard de l'accessibilité à une eau douce de qualité. La diminution de la quantité et de la qualité de l'eau douce disponible rend plus difficile l'accès à une eau douce de qualité en raison des infrastructures coûteuses nécessaires pour y accéder. De plus, la variation dans la fréquence et l'intensité des crues et des sécheresses rendra les infrastructures actuelles inadéquates aux nouveaux défis face à la gestion de l'eau. Les catastrophes naturelles participent aussi au problème d'accessibilité à l'eau en endommageant ou en détruisant les infrastructures sur place. Par exemple, les inondations causées, entre autres, par les fortes précipitations endommagent les infrastructures et mettent en péril l'accessibilité à la population à de l'eau douce propre. (UNICEF, 2015a) Une gestion intégrée de la gestion de l'eau et de l'utilisation des terres permettrait de s'adapter à la nouvelle situation face à la ressource en eau douce. Or, de telles modifications nécessiteront un changement de comportement et engendreront des investissements importants. (FAO, 2018b)

3.3 Zones vulnérables

Au courant des prochaines décennies, le climat devrait continuer à se réchauffer et à menacer la disponibilité de l'eau douce pour répondre aux besoins des populations. Le *World Resources Institute* (WRI) a analysé les données fournies par le 5^e rapport du GIEC concernant les changements climatiques et a monté des projections concernant le stress hydrique en fonction de la demande et de la disponibilité future des ressources en eau douce. La figure 3.7 montre les prédictions quant à l'évolution du stress hydrique mondial à l'horizon 2040 suivant le scénario du *statu quo* établi par le WRI, soit une combinaison entre le scénario RCP8.5 et le scénario SSP2 proposés dans le 5^e rapport du GIEC.

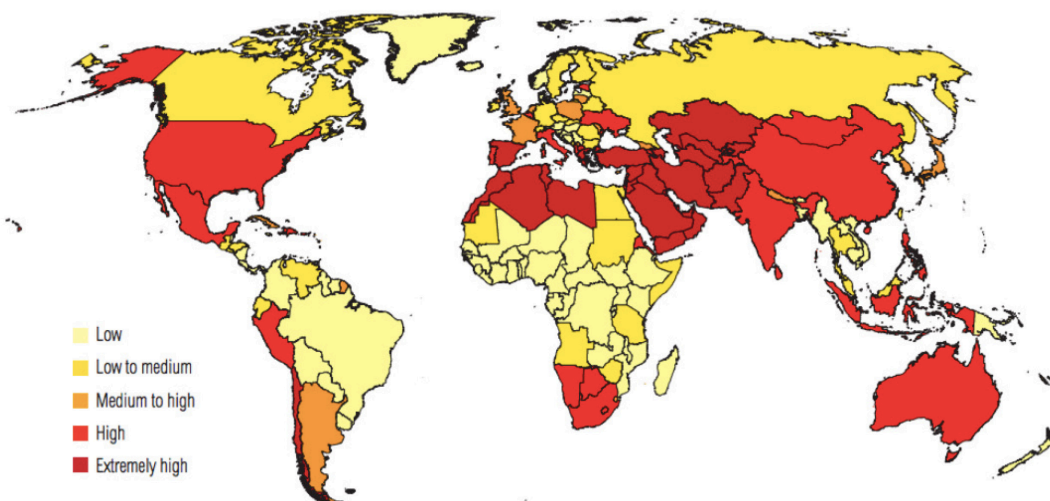


Figure 3.7 État du stress hydrique physique à l'horizon 2040 (adapté de : Luo et al., 2015).

La figure 3.7 illustre que la quantité d'eau douce disponible par habitant risque de diminuer grandement d'ici 2040 et donc d'augmenter le nombre de personnes en situation de stress hydrique (UNESCO, 2019b).

D'après les analyses du WRI, 74 pays seront en situation de stress hydrique moyen à extrêmement élevé, dont 57 pays seront en situation de stress hydrique élevé à extrêmement élevé (Luo et al., 2015). Toutefois, un réchauffement planétaire limité à 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C pourrait réduire de 50 % la proportion de la population exposée à l'intensification du stress hydrique auquel elle est soumise et qui est causé par les changements climatiques, et ce, particulièrement dans les petits États insulaires en développement (GIEC, 2018). Les prédictions concernant le stress hydrique ne considèrent pas les méthodes de gestion des ressources en eau douce utilisées par un pays sur son territoire. Il est donc possible qu'un pays fasse une gestion durable de ces ressources en eau afin d'assurer la disponibilité de l'eau douce nécessaire pour répondre à la demande même si un pays a un rapport élevé entre ses prélèvements d'eau douce et la quantité totale d'eau douce disponible (Luo et al., 2015).

Les personnes situées dans des zones où la disponibilité et l'accessibilité à de l'eau douce de qualité est inadéquate seront plus touchées par une catastrophe naturelle (UNICEF, 2015a). D'une part, l'augmentation dans l'intensité des précipitations indique que les changements climatiques ont déjà commencé à avoir une incidence sur le cycle de l'eau. Le risque d'inondation augmente particulièrement en Asie du Sud, en Asie du Sud-Est, en Asie du Nord-Est, en Afrique tropicale et en Amérique du Sud. (GIEC, 2014c) D'autre part, à l'horizon 2100, les effets des changements climatiques sur la diminution des précipitations devraient se faire ressentir le plus intensément en Afrique dans les régions arides et subtropicales sèches. Ces régions, déjà très arides, verront leurs périodes de sécheresse augmenter. En Afrique seulement, la proportion de la population en situation de stress hydrique devrait passer à 65 % d'ici 2025. Outre l'Afrique, les régions les plus exposées aux changements climatiques sont l'Asie du Sud au delta du Mékong, les îles du Pacifique à la corne de l'Afrique et des côtes de l'Amérique latine, allant jusqu'aux Caraïbes (UNICEF, 2015a).

Malheureusement, les zones les plus touchées par les impacts des changements climatiques affectant les ressources en eau douce seront les régions les plus vulnérables puisque les facteurs socio-économiques influencent grandement la capacité d'adaptation et de résilience des populations. Les populations vivant dans une situation de pauvreté ou les populations qui ont une plus grande dépendance aux ressources naturelles de leur milieu seront donc plus vulnérables aux changements climatiques. Cela vise autant des populations vivant dans des pays en développement que des populations vivant en zones marginalisées ou vivant en situation de précarité dans des pays développés. (GIEC, 2014b) Les effets des changements climatiques sur la crise de l'eau mettent en péril les avancées réalisées en matière de développement durable international face à la santé et la sécurité humaines en ayant des conséquences négatives, entre autres, sur la lutte contre la pauvreté, la mortalité infantile et la sécurité alimentaire (Coalition eau, 2014). Par exemple, l'atteinte de la sécurité alimentaire pour l'ensemble de la population mondiale subit des pressions supplémentaires. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses contribuera à la détérioration des sols, diminuera la quantité d'eau disponible et augmentera la concurrence pour l'utilisation des ressources disponibles. Quant à eux, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des

précipitations extrêmes auront pour effet de détruire des récoltes et d'ainsi diminuer la quantité de nourriture disponible. (FAO, 2018a)

Pour combattre la crise de l'eau, il est impératif d'analyser la problématique de façon systémique en incluant l'impact des changements climatiques sur la demande en eau, sur la quantité d'eau disponible, sur la qualité de l'eau disponible et aussi sur l'accessibilité aux ressources en eau douce disponible. Il est encore possible de contrôler cette crise par le biais d'une meilleure gestion des ressources en eau douce, de l'intégration de solutions technologiques, de la réorganisation des activités économiques utilisant une grande quantité d'eau douce, d'une utilisation durable des ressources en eau douce ainsi que par le biais de mesures d'adaptation et d'atténuation aux changements climatiques. (FAO, 2018a) Plusieurs outils de gestion de la crise de l'eau sont disponibles. Toutefois, la présente analyse se concentrera sur les technologies de dessalement comme outil d'adaptation aux changements climatiques qui affectent la crise de l'eau.

4 LE DESSALEMENT DE L'EAU

Les mesures d'atténuation de la crise de l'eau telles qu'assurer une meilleure gestion des écosystèmes d'eau douce, une utilisation durable des ressources en eau douce ainsi qu'une gestion intégrée et transfrontalière de l'eau permettent d'économiser de l'eau, d'améliorer l'efficacité de son utilisation et de diminuer l'écart entre la demande et la quantité d'eau disponible (Gude, 2017; ONU, 2015). Toutefois, avec l'augmentation de la demande en eau douce et la pression exercée par les changements climatiques sur la disponibilité, l'accessibilité et la qualité des ressources en eau douce, les sources conventionnelles d'eau douce comme l'eau de pluie, la fonte des neiges et le ruissellement ne suffisent plus à combler la demande (Jones, et al., 2019).

Pour lutter contre la raréfaction de l'eau et pour contribuer à l'atteinte de l'objectif 6 du Programme de développement durable des Nations Unies, les communautés vivant dans des régions vulnérables face aux ressources en eau douce ainsi que dans des régions vulnérables face aux changements climatiques ayant un impact sur les ressources en eau douce doivent combiner les mesures d'atténuation avec des stratégies qui permettent d'augmenter la quantité d'eau douce disponible pour répondre à la demande (Gude, 2017; ONU, 2015). Toutefois, l'atteinte de cet objectif n'est pas gagnée d'avance.

La gestion conventionnelle des ressources en eau doit être repensée afin de s'adapter aux changements climatiques et à l'augmentation de la demande. Les stratégies de gestion doivent inclure des sources d'eau non conventionnelles qui permettent d'augmenter l'offre en eau afin de répondre à la demande réelle. (Qadir, Jiménez, Farnum, Dodson et Smakhtin, 2018) La combinaison des mesures d'atténuation à de nouvelles mesures de gestion permettra de travailler vers l'atteinte de l'objectif 6 du Programme de développement durable à l'horizon 2030 des Nations-Unies et d'ainsi assurer le droit de l'homme à une source d'eau potable tout en réduisant la vulnérabilité des populations aux effets des changements climatiques.

Plusieurs outils technologiques permettent d'augmenter la quantité d'eau douce disponible, entre autres, des technologies de dessalement. Ces technologies présentent une option intéressante, à petite et à grande échelle, pour augmenter la quantité d'eau douce disponible. (OMS, 2017) Certaines régions où les ressources en eau douce sont rares mettent déjà en pratique les stratégies de conservation de l'eau et d'amélioration de l'offre en eau douce par le biais du dessalement de l'eau. (Jones et al., 2019 ; Jones et van Vliet, 2018). Cette section donnera un aperçu de l'utilisation actuelle du dessalement de l'eau dans le monde et des différentes technologies disponibles afin de déterminer si ces modèles de gestion sont durables.

4.1 Installations de dessalement dans le monde

D'après le *International Desalination Association* (IDA), un organisme à but non lucratif associé aux Nations Unies qui travaille exclusivement sur les technologies de dessalement et les technologies de réutilisation de l'eau, en 2019, plus de 300 millions de personnes dépendaient de l'eau douce produite par dessalement

pour répondre à leurs besoins quotidiens, en tout ou en partie. Cette eau douce était produite dans une des 20 516 usines de dessalement présentes mondialement. La capacité totale de ces usines à produire de l'eau douce est d'environ 122,32 millions m³ par jour. (International Desalination Association [IDA], 2019) Toutefois, comme l'illustre la figure 4.1, en 2018, la production d'eau douce par jour était d'environ 95 millions de m³ / jour, soit 93 % de la capacité totale (Ejaz Ahmeda, Raed, Ali et Nidal, 2019). Ce graphique illustre les installations de dessalement qui sont en opération ainsi que le total des installations de dessalement incluant celles qui ne sont pas en opération.

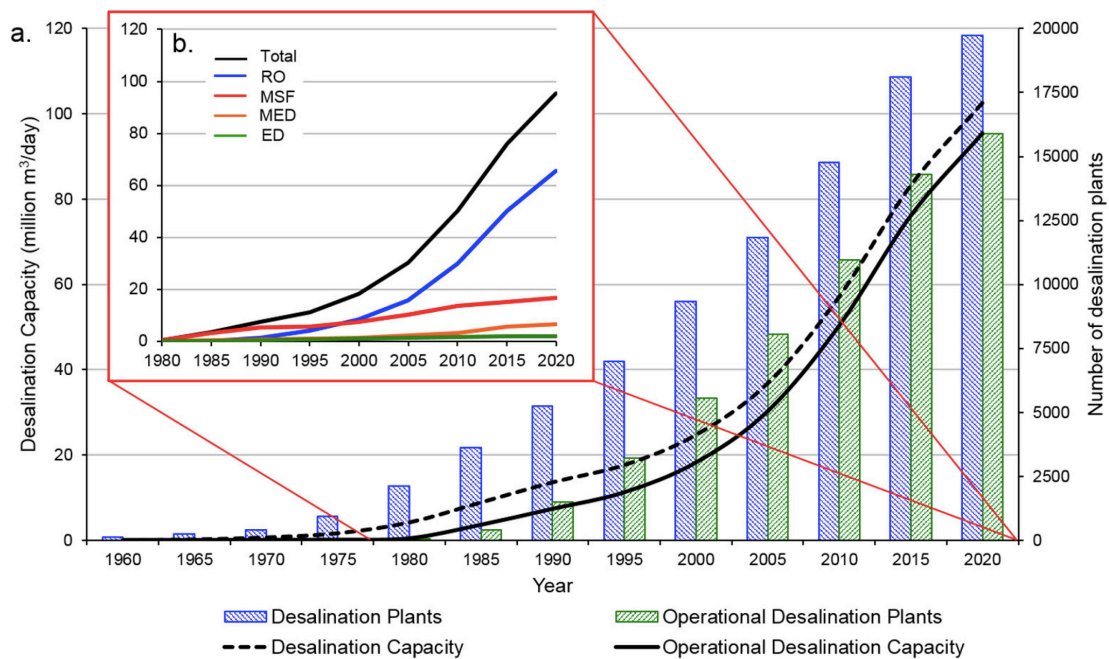


Figure 4.1 Capacité de production d'eau dessalée mondialement (tiré de : Jones et al., 2019).

En raison du coût de ces technologies, le recours au dessalement de l'eau pour répondre à la demande en eau douce était initialement principalement limité aux pays riches comme l'Arabie Saoudite et le Kuwait ou aux petits États insulaires comme l'île de Chypre et les Barbade où les sources d'eau conventionnelles sont rares. Le développement de procédés de dessalement ayant de meilleures performances, et ce, à plus faible coût fait de cet outil une avenue intéressante pour répondre à la crise de l'eau. Les régions étant les plus grandes utilisatrices du dessalement de l'eau comme moyen pour répondre à la demande sont le Moyen-Orient, le nord de l'Afrique, les États-Unis (principalement la Floride et la Californie), la Chine, l'Australie et certaines régions d'Europe. À elles seules, les régions du Moyen-Orient et du nord de l'Afrique rassemblent environ 48 % de la capacité mondiale de production d'eau douce par dessalement. La figure 4.2 illustre la répartition mondiale de la capacité de production d'eau douce par dessalement ainsi que l'utilisation qui est faite de l'eau dessalée. Il est possible de constater que la production d'eau dessalée pour utilisation à des fins de consommation humaine est présente partout dans le monde avec une prédominance dans le Moyen-Orient et dans le nord de l'Afrique. L'Asie présente une grande portion des installations de dessalement pour utilisation à des fins de production d'électricité tandis que l'Amérique du Sud,

particulièrement le Brésil, l'Amérique du Nord, le sud-ouest de l'Afrique et l'Europe regroupent une bonne quantité d'installations de dessalement à des fins industrielles. De plus, la majorité des installations de dessalement sont situées le long des côtes où elles sont généralement plus grandes que celles situées à l'intérieur des terres. Les quelques installations de dessalement situées en Afrique, en Asie du Sud, en Asie centrale et en Amérique du Sud sont généralement utilisées par le secteur industriel et privé. (Jones et al., 2019)

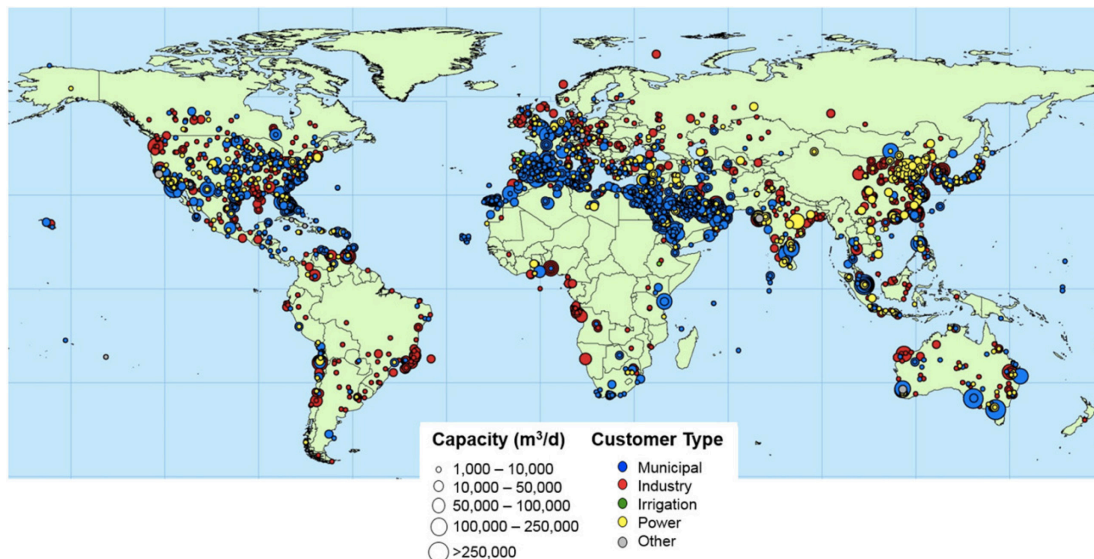


Figure 4.2 Répartition mondiale de la capacité de production d'eau dessalée et répartition mondiale de l'utilisation par secteur d'activité (tiré de: Jones et al., 2019).

Le tableau 4.1 résume la répartition des installations de dessalement dans le monde en fonction de la région géographique, du niveau de revenu et du secteur d'activité. Comme l'illustre le tableau 4.1, 63 % des installations de dessalement qui représentent 71 % de la capacité totale de production mondiale en eau dessalée sont réparties dans des pays à revenus élevés (> 12 056 \$ US PIB par personne) tandis que moins de 0,1 % de la capacité totale de production mondiale en eau dessalée est répartie dans des installations situées dans des pays à faibles revenus (< 995 \$ US PIB par personne). Il est intéressant de constater que la plus grande portion de l'eau douce produite par dessalement est utilisée pour la consommation humaine (secteur municipal), soit environ 62 % de la quantité totale d'eau douce produite mondialement par dessalement, et ce, bien que presque la moitié des installations de dessalement soit utilisée à des fins industrielles. Il est possible d'en déduire que les installations utilisées à des fins industrielles produisent une plus petite quantité d'eau dessalée que les installations utilisées à des fins de consommation humaine. (Jones et al., 2019)

Tableau 4.1 Répartition des installations de dessalement dans le monde en fonction de la région géographique, du niveau de revenu et du secteur d'activité (inspiré de : Jones et al, 2019).

Région géographique, niveau de revenu ou secteur d'activité		Quantité d'installations de dessalement	Capacité de dessalement	
			Million m ³ /jour	%
Région géographique	Moyen-Orient et Afrique du Nord	4 826	45.37	47.5
	Asie de l'Est et Pacifique	3 505	17.52	18.4
	Amérique du Nord	2 341	11.34	11.9
	Europe de l'Ouest	2 337	8.75	9.2
	Amérique latine et Caraïbes	1 273	5.46	5.7
	Asie du Sud	655	2.94	3.1
	Europe de l'Est et Asie centrale	566	2.26	2.4
	Afrique subsaharienne	303	1.78	1.9
Niveau de revenu	élevé	10 684	67.24	70.5
	moyen élevé	3 075	19.16	20.1
	faible moyen	2 056	8.88	9.3
	faible	53	0.04	0
Secteur d'activité	Municipal	6 055	59.39	62.3
	Industriel	7 757	28.80	30.2
	Électricité	1 096	4.56	4.8
	Agriculture	395	1.69	1.8
	Militaire	412	0.59	0.6
	Autre	191	0.90	0.4
TOTAL MONDIAL		15 906	95.37	100

4.2 Aperçu des technologies de dessalement

Le dessalement de l'eau est le processus par lequel le sel est retiré de l'eau afin de produire une eau ayant une quantité de sel adéquate pour la consommation humaine, l'agriculture ou les procédés industriels, soit généralement moins de 500 mg/l. Comme le nom l'indique, il s'agit de retirer le sel de l'eau ou bien d'extraire de l'eau douce de l'eau salée. (Jones et al., 2019) Le processus de dessalement s'applique à l'eau salée provenant des mers et des océans ainsi qu'à l'eau saumâtre de surface et à l'eau saumâtre des aquifères créant ainsi une source illimitée d'eau douce de bonne qualité indépendante du cycle de l'eau et du climat (Gude, 2017). Certaines sources d'eau initialement douce voient progressivement leur salinité augmenter pour devenir de l'eau saumâtre en raison, entre autres, de la surexploitation de la ressource ce qui rend l'eau non sécuritaire pour la consommation humaine et non adéquate pour plusieurs utilisations industrielles ou pour l'agriculture. Il est estimé qu'environ 30 % des ressources en eau douce souterraine sont sujettes à un problème de salinité (USGS, s. d.a). En fonction de la technologie utilisée, l'eau douce produite est soit potable pour la consommation humaine ou utilisable pour l'irrigation agricole ou pour l'utilisation dans des procédés industriels. Le dessalement de l'eau est souvent considéré comme une option viable afin de répondre à la demande en eau douce pour la consommation humaine. (Jones et al., 2019)

4.2.1 Relation entre le type d'eau d'alimentation et la technologie de dessalement

Les différentes technologies de dessalement se comparent principalement sur leur rendement ainsi que sur leur taux de rejets de saumure (BR). Le rendement d'une installation de dessalement va dépendre de la technologie utilisée et du type d'eau d'alimentation. (Jones et al., 2019) Les tableaux 4.2 et 4.3 présentent respectivement les différents types d'eau d'alimentation possible ainsi que leur salinité et les technologies de dessalement les plus répandues. Les procédés membranaires reposent sur la séparation du sel et de l'eau par le biais d'une membrane tandis que les procédés thermiques reposent sur le changement de phase de l'eau (Ejaz Ahmeda et al., 2019).

Tableau 4.2 Type d'eau d'alimentation et salinité (inspiré de : Jones et al., 2019).

Type d'eau d'alimentation	Salinité (mg/l)
Eau salée (SW)	20 000 – 50 000
Eau saumâtre (BW)	3 000 – 20 000
Eau de rivière (RV)	500 – 3 000
Eau douce (PW)	< 500
Saumure (BR)	> 50 000

Tableau 4.3 Technologie de dessalement (inspiré de : Jones et al., 2019).

Type de procédé	Technologie
Membranaire	Osmose inverse (RO)
	Nanofiltration (NF)
	Osmose (FO)
	Électrodialyse (ED)
Thermique	Électrodéionisation (EDI)
	Électrodialyse inverse (EDR)
	Distillation multieffets (MED)
	Dessalement multiples flash (MSF)
	Compression de vapeur (VP)
Hybride	Distillation par membrane (MD)

Durant le processus de dessalement, l'eau d'alimentation est séparée en deux, soit l'eau douce (le produit) et la saumure (le rejet). La saumure est une concentrée contenant les sels dissous et autres contaminants qui ont été retirés de l'eau d'alimentation pour obtenir de l'eau douce. La concentration en sel de la saumure dépend de la concentration en sel de l'eau initiale. (Wenten, Ariono, Purwasasmita et Khoirudin, 2017)

L'efficacité de procédé de dessalement sur le plan du volume est définie par le taux de récupération d'eau (RR) à la suite du traitement. Le taux de récupération indique la proportion de l'eau initiale qui est transformée en eau douce versus la proportion de l'eau initiale qui est rejetée sous forme de saumure et qui nécessite une gestion. À titre d'exemple, un RR de 0,3 signifie que 30 % de l'eau initiale est transformée en eau douce tandis que 70 % de l'eau initiale est rejetée sous forme de saumure. (Jones et al., 2019) Le RR des différentes installations de dessalement dépend de différents facteurs comme la technologie de dessalement utilisée et la qualité de l'eau initiale, c'est-à-dire son taux de salinité. D'une part, les

technologies utilisant des procédés membranaires ont généralement un plus haut RR que les technologies utilisant des procédés thermiques, donc une meilleure efficacité en termes de volume. (Xu et al., 2013). D'autre part, plus l'eau initiale a une salinité élevée, plus il sera difficile d'avoir un bon RR et plus les coûts reliés à l'exploitation de l'usine de dessalement seront élevés en raison de l'énergie nécessaire pour dessaler l'eau. Le tableau 4.4 fait état du RR en fonction des différentes combinaisons entre les technologies de dessalement et le type d'eau d'alimentation. Il est possible de constater une corrélation entre un meilleur RR et une meilleure qualité d'eau d'alimentation pour toutes les combinaisons analysées : l'eau douce ayant le meilleur RR, 0,97, et la saumure ayant le pire RR, 0,09. Le dessalement de l'eau a un meilleur RR lorsque le traitement de dessalement se fait par électrodéionisation, une technologie de dessalement par membrane encore très peu répandue à travers le monde, tandis qu'elle a le pire RR lorsqu'elle est traitée par les procédés thermiques. Le RR du dessalement de l'eau salée double lorsque traité par électrodialyse ou par électrodéionisation par rapport à lorsqu'elle est traitée par osmose inverse. (Jones et al., 2019)

Tableau 4.4 Taux de rendement en fonction des combinaisons technologie – eau d'alimentation
(inspiré de : Jones et al, 2019).

Eau d'alimentation	Technologie							
	RO	MSF	MED	NF	ED	EDI	EDR	Autre
Eau de mer (SW)	0.42	0.22	0.25	0.69	0.68	0.90	n.a.	0.40
Eau saumâtre (BW)	0.65	0.33	0.34	0.83	0.90	0.97	0.90	0.60
Eau de rivière (RW)	0.81	n.a.	0.35	0.86	0.90	0.97	0.96	0.60
Eau douce (PW)	0.86	0.35	n.a.	0.89	0.90	0.97	0.96	0.60
Saumure (BR)	0.19	0.09	0.12	n.a.	0.85	n.a.	n.a.	0.40

La grande majorité des études réalisées par rapport au dessalement s'adresse aux aspects techniques. Plus précisément, l'osmose inverse est la technologie de dessalement qui est la plus étudiée dans l'histoire des technologies de dessalement. Toutefois, les procédés émergents de dessalement comme la nanotechnologie, la distillation par membrane ainsi que l'osmose font récemment l'objet d'un nombre grandissant d'études en raison de leur fort potentiel à l'égard du RR et de la quantité d'énergie nécessaire. Pour leur part, les procédés thermiques font l'objet de moins de recherches récentes. Cette tendance peut s'expliquer en raison de la quantité d'énergie nécessaire, le RR et les impacts environnementaux des procédés thermiques par rapport aux procédés par membranes. (Jones et al., 2019) La figure 4.3 représente graphiquement le nombre d'installations de dessalement en fonction de la technologie utilisée et en fonction du type d'eau d'alimentation ainsi que leur proportion respective de capacité de production sur la capacité de production totale d'eau dessalée mondialement.

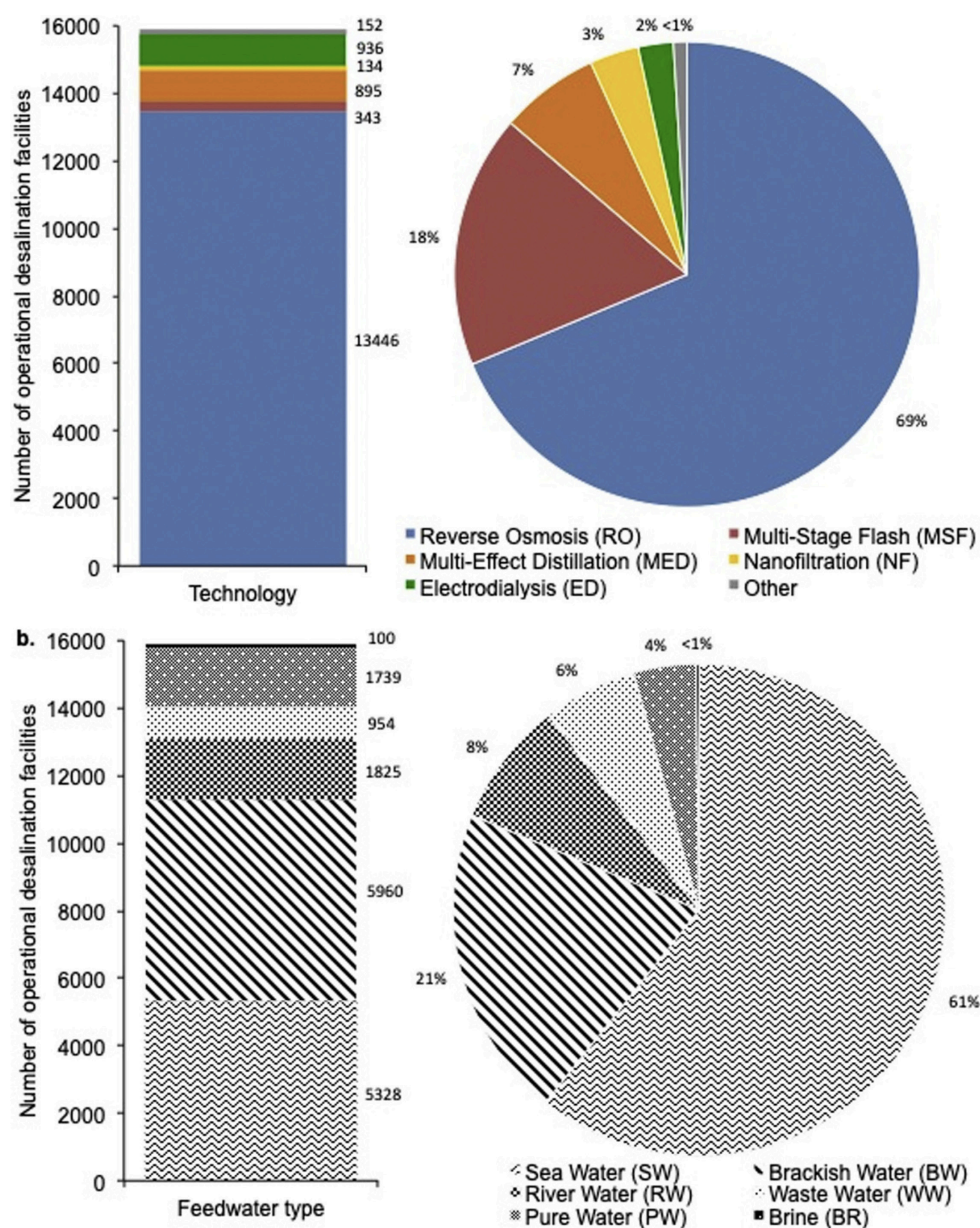


Figure 4.3 Quantité totale et capacité totale des installations de dessalement opérationnelles

(inspiré de : Jones et al, 2019).

Jusqu'aux années 1980, 84 % de la quantité totale d'eau douce dessalée était produite par des procédés thermiques, soit par le dessalement multiples flash ou par la distillation multi effets. Toutefois, cette tendance a changé puisqu'au début des années 2000, la proportion de l'eau dessalée produite par un procédé thermique, principalement MSF, sur le volume total de l'eau dessalée produite était environ la même que l'eau dessalée produite par un procédé membranaire, principalement RO, avec respectivement une production d'environ 11,6 millions m³/jour et 11,4 millions m³/jour. Ces deux types de procédés assuraient la production d'environ 93 % du volume total d'eau douce produit par dessalement, laissant aux autres technologies seulement environ 7 % de la production mondiale. L'utilisation du procédé d'osmose

inverse a continué de se répandre depuis les années 2000. En 2018, la technologie de dessalement par osmose inverse était la technologie qui avait la plus grande part du marché. En effet, elle est utilisée dans 84 % des installations de dessalement et est responsable de la production de 65,5 millions de m³ d'eau dessalée par jour, soit 69 % de la quantité totale d'eau dessalée mondialement. Les installations de dessalement utilisant un procédé thermique produisent au total 25 % de la quantité totale d'eau dessalée mondialement. (Jones et al., 2019)

Comme mentionné précédemment, autant la technologie que le type d'eau d'alimentation utilisé ont un effet sur la quantité d'eau dessalée produite ainsi que sur la concentration des rejets de saumure. L'eau salée, l'eau saumâtre et l'eau de rivière représentent au total 90 % de l'eau d'alimentation utilisée par les installations de dessalement, représentant respectivement 61 %, 21 % et 8 %. Le 10 % restant est composé d'eau usée (WW), d'eau douce et de saumure. (Jones et al., 2019) Les différentes technologies de dessalement atteignent le maximum de leur efficacité et assurent leur viabilité économique lorsqu'elles sont combinées à un ou à des types d'eau d'alimentation en particulier. C'est, entre autres, pour cette raison que certaines combinaisons de type d'eau d'alimentation et de technologies sont dominantes. Au total, huit combinaisons de type d'eau d'alimentation et de technologie sont responsable de 90 % de la quantité totale d'eau produite annuellement par des installations de dessalement mondialement : SW-RO, BW-RO, SW-MSF, SW-MED, RW-RO, WW-RO, BW-ED, RW-ED. Ces combinaisons sont présentées dans le tableau 4.5. (Jones et al., 2019)

Tableau 4.5 Combinaison type d'eau d'alimentation et type de technologie représentant 90 % de la quantité totale d'eau produite par les installations de dessalement (inspiré de : Jones et al., 2019).

Type de technologie	Pourcentage de l'eau totale produite par dessalement avec cette technologie (%)	Pourcentage des installations de dessalement utilisant cette technologie (%)	Type d'eau d'alimentation	Salinité de l'eau (mg/l)
Osmose inverse	69	84	Eau salée	20 000 – 50 000
			Eau saumâtre	3 000 – 20 000
			Eau de rivière	500 – 3 000
			Eau usée	n.a.
Dessalement multiples flash	18	2	Eau salée	20 000 – 50 000
Distillation multieffets	7	6	Eau salée	20 000 – 50 000
Électrodialyse	2	6	Eau saumâtre	3 000 – 20 000
			Eau de rivière	500 – 3 000

La figure 4.4 illustre la répartition mondiale du type d'eau utilisée pour alimenter les installations de dessalement, la technologie utilisée ainsi que la capacité des installations pour les usines de dessalement ayant une capacité de produire plus de 10 000 m³ d'eau dessalée par jour. Géographiquement, il est possible de constater à partir de la figure 4.4 que la majorité des installations de dessalement situées aux États-Unis utilisent comme eau d'alimentation de l'eau saumâtre tout comme un bon nombre d'installations situées au Moyen-Orient, précisément à l'intérieure des terres en Arabie Saoudite, et en Chine. Tandis que l'eau des rivières est principalement utilisée dans quelques régions d'Amérique du Nord et de l'Europe, l'eau salée est utilisée dans toutes les régions du monde, mais principalement dans les régions côtières. (Jones et al., 2019)

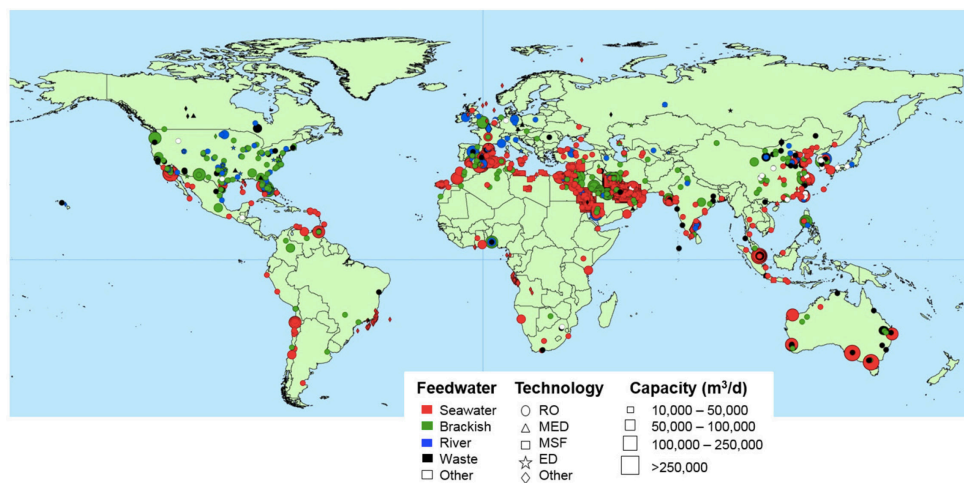


Figure 4.4 Répartition mondiale du type d'eau utilisée pour alimenter les installations de dessalement, la technologie utilisée ainsi que la capacité des installations (tire de : Jones et al., 2019).

4.2.2 Étapes du processus de dessalement

Le dessalement de l'eau est une des premières méthodes de traitement de l'eau utilisée par l'homme. De nos jours, plusieurs méthodes de dessalement sont disponibles (USGS, s. d.a). Peu importe la technologie utilisée, la procédure de dessalement comprend quatre étapes : la prise d'eau, le prétraitement, le procédé de dessalement et le post-traitement. À la fin de la procédure, l'eau est transformée en eau douce à faible concentration en sels dissous.

La prise d'eau est le processus par lequel l'alimentation de l'installation de dessalement est assurée. Cette eau subira un prétraitement. Le prétraitement de l'eau d'alimentation a pour but de protéger les installations de dessalement en retirant les contaminants qui pourraient avoir un effet négatif sur le processus comme l'encrassement des membranes ou la formation d'écailles. Il peut inclure une étape de coagulation et de filtration ou une étape de filtration par membrane qui va permettre de retirer les particules en suspensions

ainsi que les matières organiques. Bien souvent, un agent désinfectant comme le chlore est ajouté à l'eau d'alimentation lors du prétraitement afin de réduire l'encrassement des membranes et le risque d'agents pathogènes dans l'eau dessalée. Cet agent désinfectant ainsi que ces sous-produits vont majoritairement être retirés de l'eau lors du passage par le procédé de dessalement. (OMS, 2011)

Le procédé de dessalement est l'étape durant laquelle l'eau d'alimentation est déminéralisée et purifiée. Le processus de dessalement a pour but de retirer les contaminants et les matières dissoutes contenus dans l'eau d'alimentation. Certains types de procédés comme la distillation et l'osmose inverse sont particulièrement efficaces pour éliminer les microorganismes et les produits chimiques. Plus le procédé est efficace, moins le post-traitement sera complexe. (OMS, 2017) Les principales technologies seront présentées dans les sections suivantes.

Pour terminer, à la suite de son passage dans le procédé de dessalement, l'eau dessalée subit un post-traitement. Selon les installations, ce traitement inclut la désinfection de l'eau, la reminéralisation de l'eau et l'ajustement de son pH.

En règle générale, il est facile d'atteindre les standards mis en place par l'OMS à l'égard du niveau d'agents pathogènes inactifs présents dans l'eau dessalée. (OMS, 2011) Le réactif le plus fréquemment utilisé lors de la désinfection est le chlore en raison de son efficacité et de sa facilité d'utilisation (Omar et Khaldi, 2017). Bien souvent, une quantité résiduelle du réactif utilisé est maintenue dans le produit final afin d'assurer le maintien de sa qualité durant la distribution. Quant à elle, la reminéralisation est une étape importante autant pour la santé humaine que pour protéger le système d'entreposage et de distribution de l'eau pour éviter l'entartrage. L'eau issue du processus de dessalement a généralement une acidité élevée. Cela augmente la corrosivité de l'eau ce qui peut endommager le système d'alimentation en eau douce. Elle est aussi faible en minéraux puisque la grande majorité des matières dissoutes sont retirées lors du processus de dessalement. Le pH est ajusté afin de diminuer son effet corrosif. Aussi, afin de stabiliser l'eau, il est de pratique commune de mélanger l'eau dessalée à de l'eau issue de sources conventionnelles à haute teneur en minéraux afin de réintégrer les minéraux que contient normalement l'eau douce. L'eau dessalée est donc mélangée à entre 1 % et 10 % d'eau salée partiellement traitée ou d'eau douce non traitée. De plus, l'ajout de minéraux, comme le magnésium et le calcium, dans l'eau dessalée devient une pratique de plus en plus répandue autant pour rendre l'eau non corrosive que pour assurer un apport en minéraux semblable à l'apport contenu dans l'eau douce conventionnelle. Il arrive parfois que des produits chimiques anticorrosion soient introduits dans l'eau dessalée comme le silicate, l'orthophosphate ou le polyphosphate. Aucune corrélation directe entre l'ajout de ces produits et la santé humaine n'est connue à ce jour. Toutefois, il est important d'agir avec prudence et de s'assurer que la quantité et la qualité de ces produits soient appropriées. (OMS, 2011)

Les sections suivantes vont présenter brièvement les caractéristiques spécifiques des procédés thermiques et des procédés membranaires.

4.3 Les procédés thermiques : la distillation

Le but commun des technologies de dessalement utilisant des procédés thermiques est de reproduire le processus naturel d'évaporation et de condensation à une vitesse supérieure et d'ainsi réduire la quantité de sels dissous dans l'eau en la distillant. En effet, le cycle de l'eau utilise naturellement la distillation comme technique de dessalement de l'eau salée à partir de l'énergie solaire. Grâce à ce processus, la terre reçoit des précipitations d'eau douce sous différentes formes. Les précipitations représentent la plus grande source d'eau douce sur Terre. Les techniques de distillation utilisent donc de la chaleur afin de faire évaporer l'eau. Lors de l'évaporation, les molécules d'eau passent de la phase liquide à la phase gazeuse. Elles deviennent donc de la vapeur d'eau. Pour capter les molécules d'eau sous forme gazeuse, il suffit de diminuer la température afin que l'eau se condense et passe de la phase gazeuse à la phase liquide, laissant derrière elle les matières dissoutes et les autres contaminants contenus dans l'eau d'alimentation. C'est seulement au 19^e siècle que des procédés industriels ont été inventés ce qui a permis de commencer à produire de l'eau douce en grande quantité. Les premières usines de dessalement étaient situées dans des régions riches en combustibles fossiles comme le Moyen-Orient et utilisaient principalement des procédés de dessalement thermiques, entre autres, en raison du faible coût du pétrole comme source d'énergie. (Jones et al., 2019) L'eau dessalée issue de la distillation a généralement une salinité de moins de 5 mg/l (Rover, 2017).

Les procédés thermiques les plus répandus sont le MSF et le MED. Ils utilisent respectivement 96 % et 80 % de l'eau d'alimentation ayant une salinité d'au moins 20 000 mg/l. L'eau de mer représente plus de 99 % de l'eau d'alimentation utilisée avec les procédés MSF tandis qu'elle représente 92 % de l'eau d'alimentation utilisée pour les procédés MED. L'autre partie de l'eau utilisée est de l'eau saumâtre ayant une salinité élevée. La rentabilité des procédés thermiques ne dépend pas de la salinité de l'eau d'alimentation utilisée. (Jones et al., 2019)

Les procédés thermiques de dessalement ont une demande énergétique élevée en raison de la chaleur nécessaire pour porter l'eau à ébullition afin d'engendrer l'évaporation de l'eau ainsi que pour faire fonctionner les pompes dans plusieurs cas. Il est donc nécessaire que ce genre d'installation ait une source énergétique fiable. De plus, le RR, soit le volume d'eau douce produit par rapport au volume d'eau salée traité est faible. Par contre, même si l'investissement initial pour l'instauration des procédés thermiques est plus élevé que ceux de l'osmose inverse, les coûts récurrents sont plus faibles et la fiabilité est plus élevée ce qui permet de garder une certaine compétitivité face aux nouveaux procédés membranaires. Un autre point positif est que les équipements ne sont pas sensibles aux matières en suspension dans l'eau traitée et qu'une simple filtration grossière lors du prétraitement suffit avant le traitement de dessalement. (Borsani et Rebagliati, 2005; Causserand, Albasi et Roux de Balman, 2017)

Plusieurs procédés de dessalement thermiques sont utilisés dans les différentes installations autour du monde. Toutefois, cette étude portera seulement sur le premier procédé de traitement de l'eau salée, soit la distillation à simple effet ainsi que sur les techniques les plus répandues, soit le dessalement multiples

flash et la distillation multieffets. Les autres techniques de distillation comprennent : le dessalement flash multiétapes, la compression de vapeur, la distillation par dépression et la distillation par four solaire.

4.3.1 La distillation à simple effet

La distillation à simple effet est le premier procédé de traitement de l'eau salée utilisé par l'homme. Cette technique était, entre autres, utilisée sur les bateaux des marins grecs dès l'antiquité. La méthode de dessalement par distillation est celle qui permet d'éliminer la plus grande quantité de contaminants dans l'eau. Sous sa forme la plus simple, la distillation consiste à reproduire le cycle de l'eau. Il suffit de faire bouillir de l'eau salée, capturer la vapeur d'eau et la condenser pour la faire revenir sous forme liquide. La figure 4.5 montre un exemple d'unité de dessalement à petite échelle : une bouée flottante alimentée à l'énergie solaire pour distiller des petites quantités d'eau. (USGS, s. d.b)



Figure 4.5 Unité de dessalement (tiré de : USGS, s. d.b).

4.3.2 Distillation multieffets

La technique de distillation multieffets utilise le même principe que la distillation à simple effet à plus grande échelle afin de rendre la production industrielle d'eau dessalée possible. L'eau salée est portée à ébullition dans une première cellule à partir d'un fluide de réchauffage et la vapeur d'eau est recueillie dans la cellule suivante. Ce type d'installation consiste en la juxtaposition d'une série de cellules qui reproduisent le principe de la distillation à simple effet à plusieurs reprises. (Rovel, 2017) Une grande quantité d'énergie est nécessaire pour ce processus, soit entre 7 et 25 kilowatt heure par mètre cube d'eau dessalée produite (kWhm³) (Al-Amshawee, 2020).

4.3.3 Dessalement multiples flash

La technique de dessalement multiples flash a pour but de reproduire le phénomène d'évaporation et de condensation. Elle utilise un espace fermé muni d'un système à doubles serpentins accompagné de pompes. Un serpentín est alimenté par l'eau salée qui est alors portée à ébullition et qui a pour but de créer

de la vapeur d'eau tandis que l'autre serpentin est alimenté par de l'eau salée froide qui a pour but de condenser la vapeur d'eau. Quant à elles, les pompes ont comme rôle d'évacuer les gaz incondensables, de pomper l'eau dessalée et de pomper les rejets de saumure. (Rovel, 2017) Une grande quantité d'énergie est nécessaire pour ce processus, soit entre 14 et 25 kWhm³ d'eau dessalée produite (Al-Amshawee, 2020).

4.4 Les procédés membranaires

Plusieurs procédés membranaires sont utilisés dans les différentes usines autour du monde. Toutefois, cette étude portera seulement sur la technologie de l'osmose inverse et de l'électrodialyse. Les autres techniques de dessalement par membrane comprennent, entre autres : le biodessalement, le dessalement par voie électrochimique et les nanotechnologies.

4.4.1 Osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé de purification de l'eau par séparation par membranes ou filtration par membrane. Ce procédé utilise une membrane semi-perméable dont les pores sont très petits et donc à travers laquelle seulement les molécules d'eau sont capables de passer, laissant de l'autre côté les molécules de sel et autres contaminants et substances organiques dissous ou en suspension dans l'eau d'alimentation. (Omar et Khaldi, 2017) L'eau dessalée par osmose inverse a généralement une salinité d'environ 100 à 250 mg/l en fonction de la qualité de la membrane utilisée (Rovel, 2017).

En fonction de la qualité de l'eau d'alimentation, principalement de sa salinité et de sa turbidité, l'eau doit subir un prétraitement avant d'être soumise au procédé de l'osmose inverse afin de prévenir le colmatage ou l'encrassement biologique des membranes, c'est-à-dire le dépôt des matières en suspension et des microorganismes sur la membrane ce qui réduit considérablement la quantité d'eau douce produite. (Omar et Khaldi, 2017) Il est donc important de rendre le plus limpide possible l'eau d'alimentation. Ce prétraitement permet donc de filtrer et de désinfecter l'eau d'alimentation afin d'éliminer les matières en suspension et les microorganismes. Les membranes sont aussi sensibles aux oxydants comme le chlore et l'ozone ainsi qu'aux variations de pH. Il faut donc s'assurer que l'eau d'alimentation remplit plusieurs critères avant de la passer dans le procédé d'osmose inverse afin de préserver la qualité des membranes et d'augmenter leur durée de vie. (Fritzmann, Löwenberg, Wintgens et Melin, 2007) De nouvelles technologies d'osmose inverse à basse pression sont aussi en développement. L'eau est donc séparée en deux, soit en eau à faible teneur en sels et en rejets de saumure. (Gaid et Treal, 2006; USGS, s. d.a)

L'osmose inverse est le procédé qui est priorisé lorsqu'il est question de dessaler l'eau saumâtre. Les autres technologies comme l'échange ionique et l'électrodialyse sont quant à elles moins répandues à cause de leurs limites technologiques. Pour le dessalement des eaux de mer, le procédé de dessalement par osmose inverse est encore en compétition avec les procédés de dessalement thermiques. Les facteurs déterminants dans le choix de la technologie sont souvent les coûts énergétiques ainsi que la quantité d'eau à traiter ou la quantité d'eau douce à obtenir. Il n'est pas rare de voir des systèmes hybrides où il y a une combinaison entre le procédé de l'osmose inversé et le procédé de dessalement thermique. (Jones et al., 2019)

Son coût d'investissement initial est plus faible en raison de la simplicité d'installation du procédé. (Jones et al., 2019) De plus, ses frais d'exploitation sont plus faibles que celui des procédés thermiques en raison de sa plus faible consommation énergétique. Les installations de dessalement utilisant le procédé de l'osmose inverse consomment environ 2 à 6 kWhm³ d'eau douce produite (Al-Amshawee et al., 2020). Toutefois, le total des coûts d'exploitations peuvent s'avérer plus élevée que ceux reliés aux procédés thermiques. Des coûts sont reliés à la consommation énergétique qui est nécessaire pour exercer la pression sur l'eau d'alimentation afin de la pousser à travers la membrane, à l'achat des membranes semi-perméables ainsi qu'au prétraitement et au post-traitement nécessaire en fonction de la qualité de l'eau d'alimentation. Malgré les coûts d'investissement et d'exploitation, le procédé d'osmose inverse est économiquement viable avec l'ensemble des types d'eau d'alimentation. C'est donc une technologie polyvalente qui s'adapte au type d'eau d'alimentation disponible dans le milieu où une quantité d'eau douce supplémentaire est requise. Elle est habituellement utilisée afin de produire de l'eau douce à partir de l'eau salée ou de l'eau saumâtre à grande échelle. (Jones et al., 2019) Les nouvelles usines de dessalement à grande échelle présentes au Moyen-Orient optent majoritairement pour le procédé d'osmose inverse en raison de la plus faible consommation d'énergie nécessaire à son exploitation. (Kurihara, M. et Takeuchi, H, 2018) Le tableau 4.6 illustre le pourcentage de l'eau produite par osmose inverse mondialement.

Tableau 4.6 Eau dessalée produite par osmose inverse (tiré de : Jones et al., 2019).

Type d'eau d'alimentation	Pourcentage de l'eau totale produite par RO (%)	Pourcentage de l'eau totale produite par dessalement (%)
Eau salée	50	34
Eau saumâtre	27	19
Eau de rivière	23	7
Eau usée		5

4.4.2 Électrodialyse

L'électrodialyse est un procédé qui a été commercialisé dans les années 1960. Cette technologie est souvent utilisée en combinaison à l'osmose inverse lorsque l'eau saumâtre circule sous terre ou pour obtenir de l'eau utilisable pour les procédés industriels puisque la combinaison des deux technologies permet d'obtenir une eau à plus faible teneur en sels dissous. Tout comme l'osmose inverse, le but de cette technologie est de séparer le sel et l'eau à l'aide d'une membrane. Dans le cas de l'électrodialyse, cette séparation est engendrée par un champ électrique qui permet de retirer les composants ioniques et non ioniques de l'eau d'alimentation. (Ben Sik Ali, Mnif, Hamrouni et Dhahbi, 2010)

Cette technique ne requiert l'utilisation que d'un prétraitement ou post-traitement de base, donc moins de produits chimiques, et a généralement un taux de récupération élevé. De plus, elle est capable de retirer que certains ions monovalents prédéterminés. C'est un avantage considérable puisque l'électrodialyse est en mesure de générer une eau douce qui répond à des besoins spécifiques comme en matière de consommation humaine et d'agriculture. (Al-Amshawee et al., 2020; Ben Sik Ali et al., 2010) Les

installations de dessalement à l'électrodialyse utilisent principalement de l'eau d'alimentation ayant une salinité moindre : 60 % de l'eau d'alimentation est de l'eau saumâtre et 20 % de l'eau d'alimentation est de l'eau de rivière (Jones et al., 2019). Sa consommation énergétique pour produire 1 m³ d'eau dessalée est aussi très intéressante, soit entre 1 et 12 kWhm³. Toutefois, même si l'électrodialyse comporte plusieurs avantages certaines limitations ralentissent son déploiement à plus grande échelle. (Al-Amshawee et al., 2020)

5 ENJEUX RELATIFS AU DESSALEMENT DE L'EAU ET PISTES DE SOLUTIONS

Les études prédisent que les installations de dessalement devront augmenter leur capacité de production d'eau douce par jour afin de répondre à la demande. Il sera donc question d'usines de dessalement ayant la capacité de produire des mégatonnes d'eau douce par jour. (Kurihara, M. et Takeuchi, H., 2018) Les technologies de dessalement qui ont été décrites dans le chapitre précédent permettraient de répondre en tout ou en partie à la crise de l'eau en augmentant la quantité d'eau douce disponible (Jones et al, 2019). Toutefois, malgré son potentiel, le dessalement de l'eau comporte des enjeux et des considérations économiques, sociales et environnementales (Richter et al., 2013; Roberts, Johnston et Knott, 2010). Alors que cette méthode de gestion gagne en popularité, peu d'études portent sur les risques réels reliés au dessalement de l'eau.

En effet, le dessalement de l'eau présente des enjeux environnementaux, économiques et sociaux, positifs et négatifs, qui méritent d'être analysés afin de limiter la création d'impacts néfastes découlant de leur utilisation. Le développement continu des techniques de dessalement permet d'améliorer la performance du processus de purification et de diminuer le coût énergétique tandis que l'utilisation de sources d'énergies renouvelables permet de diminuer le coût économique et le coût environnemental associés aux technologies de dessalement (Roberts et al., 2010; Richter et al., 2013). Toutefois, les impacts reliés au dessalement de l'eau sont toujours présents à différents égards en fonction de la technologie utilisée. La présente section portera sur les enjeux environnementaux, sociaux et économiques entourant le dessalement de l'eau. Elle proposera aussi des pistes de solutions afin de gérer durablement ces enjeux dans l'optique de rendre le dessalement de l'eau un outil de gestion favorable au développement durable. Les enjeux analysés n'incluent pas les impacts reliés à la phase de construction du projet de dessalement, notamment les impacts reliés à la modification du territoire.

5.1 Enjeux environnementaux

Les technologies de dessalement apportent des aspects positifs et négatifs à l'égard de l'environnement. L'aspect positif principal est la création de volumes d'eau douce supplémentaires afin de répondre à la demande en eau douce et de faire face à la crise de l'eau. Toutefois, plusieurs impacts environnementaux négatifs découlent du dessalement de l'eau, et ce, peu importe la technologie utilisée pour procéder au dessalement. En raison de l'importance du dessalement de l'eau dans la lutte contre la crise de l'eau, il est primordial de comprendre quels sont ces enjeux négatifs afin d'y répondre avec des solutions durables.

5.1.1 Prise de l'eau d'alimentation

L'exploitation des installations de dessalement inclut inévitablement l'étape de la prise de l'eau d'alimentation. Malgré que peu de données existent sur les effets réels des prélèvements, leurs impacts sur les milieux aquatiques sont bien connus. En effet, la prise de l'eau engendre l'entraînement et la collision d'organismes marins ce qui a un impact majeur sur leur population dans les zones de prélèvement (ONU, 2017). L'entraînement se définit comme « le transport de petits organismes planctoniques avec le flux d'eau

de mer vers les usines de dessalement » (ONU, 2017). Il est reconnu que les organismes présents dans l'eau d'alimentation périront durant les différentes étapes du procédé de dessalement (ONU, 2017). Afin de réduire l'effet d'entraînement, il est recommandé de placer les prises de captation de l'eau d'alimentation à l'écart des zones biologiquement productives. Cela peut se traduire par des prises situées au large des côtes dans des eaux plus profondes. Les petites installations peuvent aussi opter pour l'utilisation de puits souterrains côtiers. Cette dernière technique est plus difficilement réalisable pour les installations produisant un gros volume d'eau dessalée. (Elimelech et Phillip, 2011)

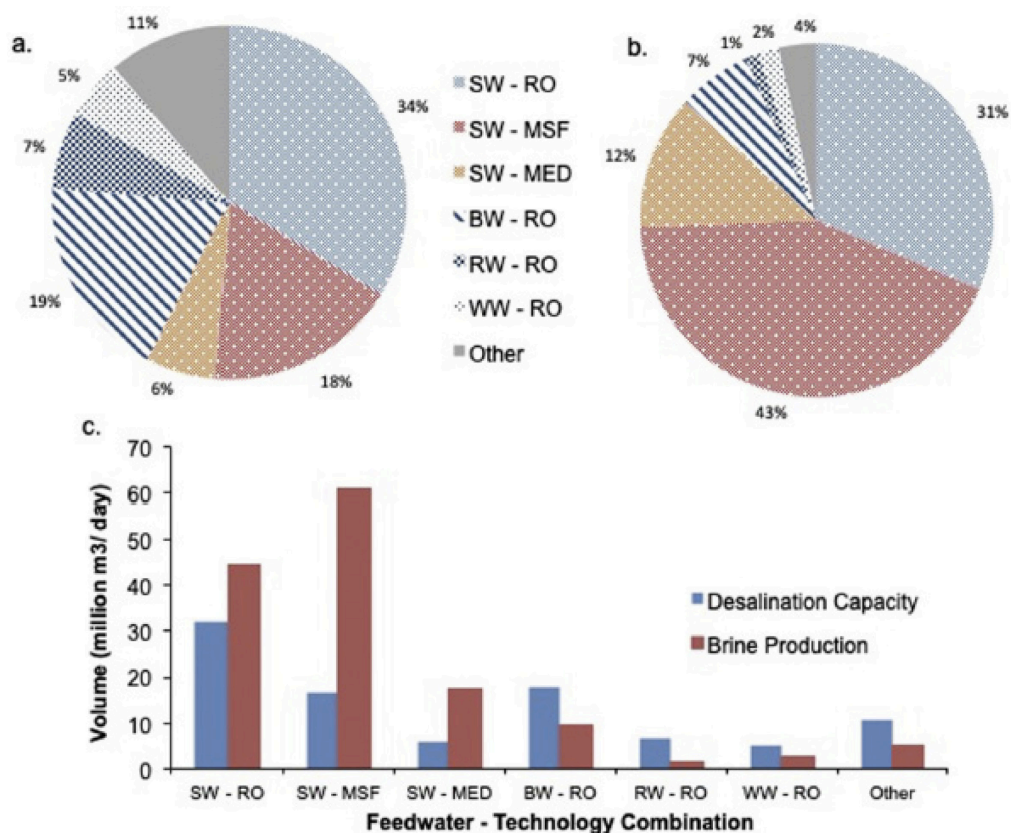
La collision est le phénomène par lequel les organismes assez grands pour ne pas passer par les écrans de prise d'eau sont piégés sur ceux-ci par leur force d'aspiration (ONU, 2017). Cela peut avoir un impact sur la population des organismes pris au piège ainsi que sur la productivité de l'installation de dessalement qui capte moins d'eau d'alimentation lorsque la prise d'eau est partiellement bloquée par des organismes aquatiques. Afin d'éviter un tel problème, il est conseillé d'utiliser une combinaison d'écrans de captation et d'utiliser une faible vitesse d'aspiration pour le prélèvement de l'eau. Les normes des États-Unis prévoient que la vitesse d'aspiration ne doit pas dépasser 0,152 m par seconde tandis que le projet ProDes financé par l'Union européenne suggère une vitesse d'aspiration maximale de 0,10 m par seconde. (ONU, 2017)

5.1.2 Rejet de saumure et d'eau usée

Le sous-produit principal de l'eau dessalé est de l'eau salée concentrée : de la saumure. La saumure représente environ 90 % des rejets totaux d'une installation de dessalement. Le 10 % restant incluant les autres sous-produits comme les eaux usées issues du prétraitement et du nettoyage des équipements (Voutchkov, Kaiser, Stover, Lienhart et Awerbuch, 2019). La présente section traitera seulement des rejets de saumure. Les autres sous-produits sont normalement traités suivant la réglementation entourant les eaux usées avant d'être rejetés.

La saumure se définit comme le rejet salin des installations de dessalement et comme le rejet salin et chaud des installations de dessalement utilisant un procédé thermique (ONU, 2017). Le rejet de saumure contient entre 1,5 à 2,0 fois plus de minéraux que l'eau d'alimentation (Voutchkov, 2019). Plus le taux de récupération de l'eau d'une installation est élevé, plus le rejet de saumure va être concentré (Ladewig et Asquith, 2012). Pour la production d'environ 95 millions de m³ d'eau douce par jour, soit la production mondiale actuelle, il y a un rejet d'environ 141,5 millions de m³ de saumure par jour, soit un total de 51,7 milliards m³ par année. Cela représente environ le double de la quantité d'eau douce produite par dessalement annuellement. (Jones et al., 2019) De façon générale, l'ensemble des régions productrices d'eau dessalée ont un taux de récupération d'eau d'environ 0,5. Donc, pour chaque unité d'eau dessalée produite, une unité de saumure est produite. Toutefois, les régions dont les installations de dessalement utilisent des procédés thermiques comme le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord sont responsables d'environ 70 % de la production mondiale annuelle de saumure, soit environ 100 millions de m³ de saumure par jour. Cela s'explique par le très faible taux de récupération d'eau de leurs installations qui se situe à environ 0,25. Les régions du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord sont responsables de la production d'environ 48 % de

la quantité totale d'eau dessalée annuellement, soit environ 45 millions de m³ par jour. Cette région produit donc plus de saumure par jour que d'eau dessalée. À l'autre extrême, l'Amérique du Nord est un cas intéressant puisqu'ils produisent moins de saumure que d'eau dessalée ce qui permet de déduire que leurs installations ont un meilleur RR. La moyenne du taux de rendement des installations de dessalement d'Amérique du Nord est de 0,75. (Jones et al., 2019) Ce taux de récupération d'eau supérieur à la moyenne peut être expliqué par le fait que la majorité des installations de dessalement situées en Amérique du Nord utilise de l'eau saumâtre comme eau d'alimentation. En fonction du type de technologie, il est possible d'obtenir un meilleur RR en utilisant de l'eau saumâtre. La figure 5.1 présente la corrélation entre la combinaison type d'eau-technologie utilisée et le taux de récupération d'eau ainsi que leur production de rejets de saumure.



- a) proportion de la production d'eau dessalée mondiale en pourcentage (%).
b) proportion de la production mondiale de saumure pourcentage (%).
c) capacité de production totale d'eau dessalée et production de rejets de saumure associée en million m³/jour.

Figure 5.1 Principales combinaison type d'eau d'alimentation - technologie (inspiré de : Jones et al., 2019).

Les effets des rejets de saumure sur l'environnement inquiètent l'ONU puisqu'une mauvaise gestion de ces rejets a divers impacts négatifs sur l'environnement. La gestion sécuritaire des rejets de saumure produits lors du processus de dessalement est un défi environnemental et économique important (Roberts et al.,

2010). Traditionnellement, quatre méthodes de gestion sont priorisées, soit le rejet en eau de surface (ce qui inclut l'élimination en mer), l'injection en puits profonds, l'irrigation et les bassins d'évaporation (Morillo et al., 2014). Le coût économique entourant la gestion des rejets de saumure reste stable depuis plusieurs années principalement en raison de la simplicité technique des méthodes utilisées dont les coûts associés sont difficiles à réduire. Chaque méthode de gestion présente ses risques et ses avantages. Les effets environnementaux d'une mauvaise gestion s'intensifient en fonction de la concentration et de la quantité des rejets. (Ladewig et Asquith, 2012) La gestion sécuritaire des rejets est encadrée par le cadre législatif des différentes régions du monde. Toutefois, le respect des lois et des règlements n'est pas assuré dans toutes les régions.

Le choix de la méthode de gestion des rejets de saumure dépend de la localisation géographique des installations de dessalement, de leur concentration en sels dissous, de leur volume, du coût, de l'encadrement législatif, de l'acceptation sociale et des possibilités d'agrandissement des installations de dessalement. La localisation géographique et le volume des rejets de saumure sont toutefois les facteurs les plus déterminants dans le choix de la méthode de gestion. (Ladewig et Asquith, 2012) La figure 5.2 illustre la relation entre le coût de chacune de ces méthodes de gestion et la concentration des rejets.

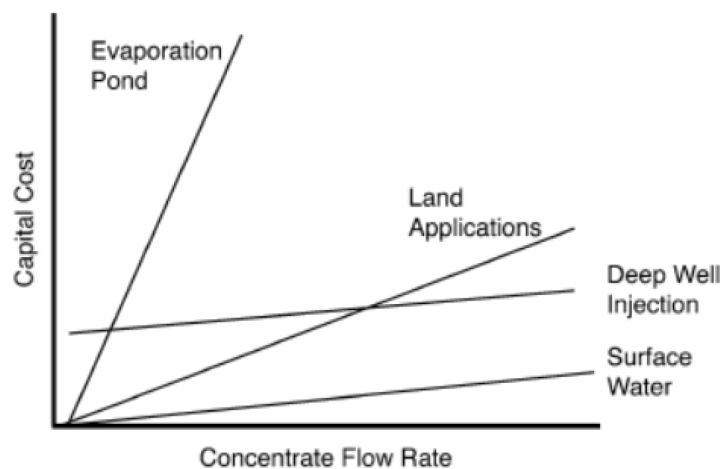


Figure 5.2 Relations entre le coût des méthodes de gestion et la concentration des rejets de saumure
(inspiré de : Ladewig et Asquith, 2012).

Une méthode de gestion moins répandue est l'injection en puits profonds. Un schéma de cette méthode est disponible à l'annexe 1. Cette méthode requiert des conditions très spécifiques pour être efficace. Elle consiste à injecter les rejets de saumure dans les cavités des roches très profondes. Des roches imperméables sont alors utilisées pour empêcher le déplacement des saumures dans le but d'éviter la contamination de l'écosystème, notamment des réserves d'eau douce souterraines. Malgré ses particularités et les risques liés à cette méthode de gestion, son coût économique peut être intéressant pour les installations de dessalement à grande échelle situées à l'intérieur des terres. (Ladewig et Asquith, 2012)

L'utilisation des rejets de saumure pour l'irrigation est réalisable dans certains cas spécifiques où une grande portion de terre est disponible. Aussi, les rejets doivent être utilisés pour l'irrigation de cultures ayant une haute tolérance à la salinité. Les espèces halophytes sont généralement tolérantes à une haute salinité tout comme la canne à sucre, le coton et la tomate. Cette méthode de gestion est recommandée seulement dans les cas de petites installations de dessalement produisant une petite quantité de rejets de saumure. Une utilisation non prudente de ce type d'irrigation peut avoir des effets néfastes sur l'environnement puisqu'il y a un potentiel d'accumulation de sels dans le sol et de contamination des sources d'eau douce souterraine. Aussi, l'utilisation des rejets de saumure pour l'irrigation peut causer un ralentissement de croissance si la culture sur laquelle l'irrigation est appliquée n'a pas une tolérance adéquate au sel puisqu'une concentration en sel trop élevée empêche la plupart des cultures d'absorber l'eau. En général, il est nécessaire de diluer les rejets de saumure avec une source d'eau à faible teneur en sels dissous afin de diminuer la salinité. Il est aussi important de porter une attention particulière aux contaminants que peut contenir la saumure. (Ladewig et Asquith, 2012)

Quant à eux, les bassins d'évaporation sont une méthode de gestion des rejets de saumure très simple. Comme son nom l'indique, le but est de pomper les rejets de saumure dans des bassins d'évaporation. L'eau s'évapore donc avec l'effet de l'énergie du soleil. Il est donc possible de récupérer les sels une fois la totalité de l'eau évaporée. Si les bassins ne sont pas bien conçus, il y a un risque important de fuites. Comme dans le cas de l'irrigation, une fuite peut causer la contamination du sol et des sources d'eau douce. Le coût relié à cette méthode de gestion dépend du volume de saumure, du coût de la terre et du taux d'évaporation. C'est une possibilité intéressante lorsque l'installation de dessalement se situe à l'intérieur des terres dans une région avec peu de précipitations, un haut taux d'évaporation et une grande disponibilité de terres à un faible coût. Elle est, entre autres, répandue au Moyen-Orient et en Australie. (Ladewig et Asquith, 2012)

Le rejet en eau de surface est l'option de gestion la plus économique, peu importe le volume des rejets de saumure et conséquemment la plus répandue. Cela signifie que les rejets de saumure sont acheminés à une étendue d'eau de surface. En fonction des caractéristiques des rejets de saumure, il se peut que les rejets soient prétraités ou mélangés à une autre source d'eau avant d'être rejetés afin de réduire la concentration en sels dissous et autres contaminants des rejets et d'ainsi respecter les lois et règlements en vigueur encadrant la protection de l'environnement. La conception du site de rejet est importante afin de réduire les impacts environnementaux. Bien souvent, l'obtention d'un permis est nécessaire et est souvent tributaire du respect de normes de qualité. Parfois, certaines réglementations vont permettre une zone où l'installation de dessalement a le droit de ne pas respecter les normes de qualité, soit une zone tampon. (Ladewig et Asquith, 2012)

Les mauvaises pratiques entourant cette méthode de gestion ont des impacts variables sur le milieu récepteur en fonction des caractéristiques du milieu, de la concentration en sels et autres contaminants des saumures ainsi que de leur volume. De façon générale, ces rejets peuvent être néfastes en raison de leur

haute teneur en sels ou à cause des polluants qu'ils peuvent contenir comme le chlore, les métaux lourds, les coagulants et les autres produits chimiques. (Ladewig et Asquith, 2012) Notamment, les changements dans les caractéristiques physico-chimiques de l'eau à proximité du lieu de décharge, dont la salinité de l'eau, posent des risques importants sur les écosystèmes aquatiques (Palomar and Losada, 2011; Roberts et al., 2010). La salinité élevée des rejets de saumure fait en sorte que leur densité est plus élevée que la densité du milieu récepteur. Cette différence de densité peut engendrer la création de zones de concentration en sels plus élevée. L'intensité de cet effet est variable en fonction de plusieurs facteurs comme le volume des rejets, le mode de rejet et la vitesse de dispersion des rejets. (Jones et al., 2019; ONU, 2017) Si le site de rejet est mal choisi, les rejets peuvent avoir des impacts négatifs sur la vie aquatique puisque bien que la plupart des espèces s'adaptent à de petites variations dans la salinité de l'eau, certaines espèces sont incapables de tolérer une exposition prolongée à une salinité plus élevée que la normale. En effet, des études en laboratoire et sur le terrain permettent de soutenir le fait que l'exposition prolongée à une salinité plus élevée que normale a des effets négatifs variés sur certaines espèces biotiques. Quant à elles, certaines espèces voient leur productivité primaire et leur chlorophylle augmenter sur le court terme tandis que d'autres ne sont pas affectées par les changements dans la salinité de l'eau. (Ladewig, 2012; Jones et al., 2019).

Dans le cas des rejets de saumure d'installations utilisant un procédé thermique, la température des rejets est souvent plus élevée que la température de l'eau du milieu récepteur. Cela peut causer une augmentation dans la température de l'eau entourant la zone de déverse. D'ailleurs, les études montrent que la salinité et la température sont deux facteurs inhibiteurs pour la survie et la croissance de la faune et de la flore aquatique. (ONU, 2017) La création de zones de salinité élevée peut engendrer la stratification de l'eau aux endroits de décharge. Associée à une température élevée cela peut avoir comme impact de causer des zones d'eutrophisation, soit des zones où la concentration en oxygène dissous dans l'eau diminue. Ultiment, cela a un impact négatif sur la faune et la flore aquatique vivant ou passant par la zone d'eutrophisation puisqu'ils risquent de manquer d'oxygène. Cela peut causer des effets observations dans la chaîne alimentaire, et ce, particulièrement chez les organismes benthiques. (Frank, Rahav et Bar-Zeev, 2017; ONU, 2017) Finalement, le rejet peut avoir un impact esthétique sur la couleur et la senteur de l'eau s'il contient des produits utilisés lors du prétraitement et du post-traitement (ONU, 2017).

Quant à eux, les contaminants présents dans les rejets peuvent avoir un effet dévastateur sur le vie marine. Des métaux lourds peuvent se trouver dans les rejets de saumure s'ils sont présents dans l'eau d'alimentation ou par l'effet de la corrosion lors de transport des rejets, en particulier dans le cas des installations thermiques. Le dépôt des métaux lourds dans les sédiments marins peut mener à leur accumulation et à leur ingestion par des organismes vivants. Les produits chimiques utilisés lors du prétraitement et pour nettoyer les installations de dessalement sont généralement néfastes pour l'environnement. Un prétraitement efficace réduit la quantité de produits chimiques nécessaire pour nettoyer les installations. Ces effluents doivent être traités avant d'être mélangés aux rejets de saumure ou être

envoyés dans des usines de traitement adéquat. Toutefois, il arrive que les rejets des eaux usées soient mélangés aux rejets de saumures sans être traités préalablement. (Ladewig et Asquith, 2012)

Comme il est possible de constater à partir de la figure 5.3, de grands producteurs de saumures sont situés à moins de 10 km des côtes, comme l'Australie, la Chine, l'Inde, le Moyen-Orient, le nord de l'Afrique et les États-Unis. Dans une telle situation, les saumures sont souvent rejetées directement dans les océans ou les mers sans traitement préalable en raison du faible coût et du manque de réglementation encadrant la pratique. À l'heure actuelle, environ 80 % des rejets de saumure sont produits à l'intérieur de 10 km des côtes. Dans la région du Moyen-Orient seulement, plus de 72 millions de m³ de saumure par jour sont produits à l'intérieur de 10 km des côtes. Cela représente plus de 50 % de la quantité totale de saumure produite par jour mondialement. Toutefois, les rejets de saumures produits à l'intérieur des terres ne font pas l'objet d'une meilleure gestion. En effet, peu d'options durables sont disponibles pour gérer les plus de 21 millions de m³ de saumure produite par jour à l'intérieur des terres. (Morillo et al., 2014)

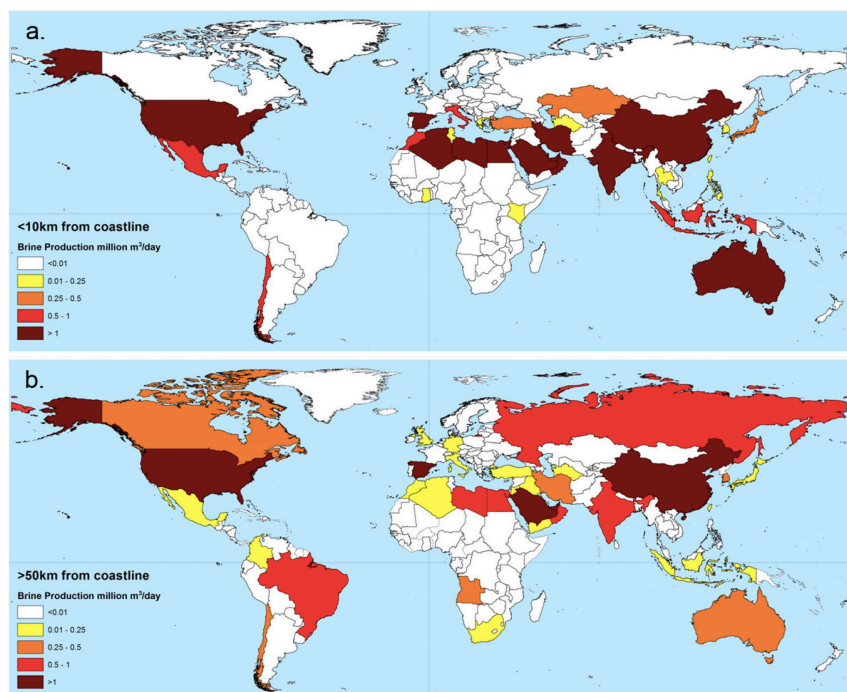


Figure 5.3 Volume de saumure produit par pays (millions m³/jour) (inspiré de : Jones et al., 2019).

5.1.3 Écosystèmes terrestres

Autant les procédés thermiques que les procédés membranaires assurent la filtration de la majorité des matières inorganiques durant le processus de dessalement. Toutefois, il est possible qu'une certaine quantité de bore (B) et de bromure (Br⁻) soit présente dans l'eau issue du dessalement, particulièrement dans l'eau dessalée par osmose inverse. Le bromure est un anion naturellement présent en très grande quantité dans l'eau salée et qui peut aussi être présent en petite quantité dans des sources d'eau douce souterraines qui sont affectées par l'intrusion de l'eau salée. Le bore peut se trouver naturellement dans

l'eau salée, principalement sous forme de dihydrogène borate (H_2BO_3^-). Cette matière inorganique est essentielle à la croissance des plantes. Toutefois, lorsqu'elle est présente en trop grande quantité elle devient un herbicide ce qui peut avoir des impacts négatifs lorsque l'eau est utilisée pour l'irrigation. L'impact négatif du bore est modulé en fonction des précipitations et en fonction de la sensibilité respective de chaque type de plante. L'encadrement de la concentration maximale de bore permise dans l'eau devrait prendre en considération les caractéristiques spécifiques du milieu, notamment l'utilisation de l'eau, les précipitations et la sensibilité des plantes de la région en question. Les normes de l'OMS indiquent une concentration de bore pouvant aller jusqu'à 2,4 mg/l pour l'eau potable. (OMS, 2011; OMS 2017)

5.1.4 Consommation énergétique

Le dessalement de l'eau requière une quantité d'énergie variable en fonction de la technologie utilisée. Toutefois, des analyses sur le cycle de vie sont venues à la conclusion que les installations de dessalement requièrent plus d'énergie pour produire une quantité d'eau donnée que pour importer cette même quantité d'eau (UNESCO, 2012). Pour les procédés membranaires, plus l'eau est salée, plus la pression requise pour produire de l'eau douce est élevée ce qui nécessite une plus grande quantité d'énergie. Quant à eux, les procédés thermiques sont connus pour utiliser une plus grande quantité d'énergie pour une même quantité et qualité d'eau d'alimentation que les procédés membranaires. (Jones et al., 2019) Le procédé membranaire de l'osmose inverse qui est actuellement la technologie de dessalement la plus utilisée a une consommation énergétique moyenne d'environ 3,5 kWhm³ tandis que les procédés thermiques ont une consommation énergétique moyenne d'environ 17 kWhm³. En 2018, un total de 1,4 gigawatt heure (GWh) étaient utilisés pour la production annuelle d'eau dessalée mondialement. Les projections prédisent une augmentation de l'utilisation de ces technologies et donc une augmentation de la quantité d'énergie utilisée pour le dessalement de l'eau pourrait atteindre jusqu'à 2,4 GWh d'ici 2030. (Al-Amshawee, 2020; Wakil Shahzad, Burban, Ybyraiymkul et Choon Ng, 2019)

Plusieurs régions comme le Moyen-Orient utilisent des produits pétroliers pour alimenter les centrales de dessalement. Or, la combustion des produits pétroliers rejette des polluants dans l'air, comme le CO₂ qui contribue aux changements climatiques. (Wakil Shahzad et al., 2019) Si toutes les installations de dessalement utilisaient du pétrole comme source d'énergie, l'industrie du dessalement consommerait plus de 850 millions de tonnes de pétrole par année afin de produire environ 90 millions m³ d'eau douce par jour ce qui générerait environ 76 millions de tonnes de GES par année (Aamer et al., 2018).

Environ 80 % de l'énergie utilisée par les installations de dessalement est produite par électricité thermique. Les centrales d'électricité thermique utilisent quant à elles une grande quantité d'eau dans leur processus de production d'électricité. Aussi, elles ont un rendement bien en dessous des limites de la thermodynamique ce qui n'optimise pas l'utilisation des ressources en eau. (Wakil Shahzad et al., 2019) Il y a donc contradiction entre le but des technologies de dessalement et les impacts de ces technologies en raison de la source d'énergie utilisée actuellement. En effet, comme mentionné précédemment, la crise de l'eau est, entre autres, accentuée par les changements climatiques. Les changements climatiques sont

causés, entre autres, par l'émission de GES de nature anthropique. Les technologies de dessalement sont perçues comme une solution pour répondre à la crise de l'eau. Toutefois, la production de l'énergie nécessaire pour alimenter les installations de dessalement engendre l'émission de GES et l'utilisation d'une quantité d'eau supplémentaire. Donc, dans les conditions actuelles, la solution à la crise de l'eau contribue, à petite échelle, à cette même crise puisqu'elle contribue aux changements climatiques et à la raréfaction de l'eau. (Wakil Shahzad et al., 2019)

5.2 Enjeux économiques : coût des installations

Le coût économique relié à la production d'eau douce par dessalement inclue d'une part le coût d'investissement initial et d'autre part le coût d'exploitation. La prise de conscience face aux impacts environnementaux reliés au dessalement fait en sorte que la violation des obligations environnementales engendre dorénavant des coûts importants pour les installations de dessalement, en fonction de leur localisation géographique. (WBG, 2019b) Le coût d'investissement varie en fonction du type de technologie utilisée. Le tableau 5.1 présente la moyenne mondiale des coûts de dessalement.

Tableau 5.1 Moyenne mondiale des coûts de dessalement (inspiré de : WBG, 2019b)

Technologie de dessalement		Coût d'investissement (million \$ US/million de litres par jour)		Coût d'opération et de maintenance (\$ US/m ³)		Coût de production d'eau dessalée (\$ US/m ³)	
		intervalle	moyenne	intervalle	moyenne	intervalle	moyenne
MSF		1,7-3,1	2,1	0,22-0,30	0,26	1,01-1,74	1,44
MED		1,2-2,3	1,4	0,11-0,25	0,14	1,12-1,50	1,39
SWRO – mer Méditerranée		0,8-2,2	1,2	0,25-0,74	0,35	0,64-1,62	0,98
SWRO – Golf arabe		1,2-1,8	1,5	0,36-1,91	0,64	0,96-1,92	1,35
SWRO – Mer rouge		1,2-2,3	1,5	0,41-0,96	0,51	1,14-1,70	1,38
SWRO – Océans atlantique et pacifique		1,2-7,6	4,1	0,17-0,41	0,21	0,88-2,86	1,82
Hybride	MSF - MED	1,5-2,2	1,8	0,14-0,25	0,23	0,95-1,37	1,15
	SWRO	1,2-2,4	1,3	0,29-0,44	0,35	0,85-1,12	1,03

Le coût de production moyen le plus faible est de 0,98 \$ US/m³ tandis que le coût de production moyen le plus élevé est de 1,82 \$ US/m³. Ces deux coûts extrêmes sont associés au procédé de l'osmose inverse, dans le premier cas lorsque son eau d'alimentation vient de la mer Méditerranée et dans le deuxième cas son eau d'alimentation vient des océans. Donc, le coût de production d'eau dessalée moyen varie d'environ 0,50 \$ US en fonction du type de procédé utilisé et du type d'eau d'alimentation dans le cas des installations utilisant le procédé de l'osmose inverse. (WBG, 2019b)

Malgré les développements technologiques, la production d'eau dessalée reste grandement plus coûteuse que la production d'eau potable provenant de sources conventionnelles. À titre indicatif, le coût de production d'eau potable à partir de sources d'eau conventionnelles au Québec est d'environ 0,69 \$ CAD/m³, donc environ 0,53 \$ US/m³ (Banque du Canada, 2020; Gouvernement du Québec, 2015).

Toutefois, le coût plus élevé relié à l'eau dessalée est plus facilement accepté puisque ces technologies sont utilisées dans des endroits où le besoin en eau douce est criant. Les régions ont bien souvent comme seule autre option de ne pas avoir assez d'eau potable ou d'avoir une eau potable de mauvaise qualité. (Cotruvo et al., 2010) Par contre, ce n'est pas optimal d'un point de vue économique d'utiliser les technologies de dessalement s'il y a une source d'eau douce conventionnelle renouvelable disponible (Speckhahn, S. et Isgren, E., 2019).

5.3 Enjeux sociaux

Les technologies de dessalement ont un impact positif à bien des égards quant à l'aspect social puisqu'elles permettent de répondre à un besoin essentiel : la demande en eau douce. L'apport supplémentaire en eau douce de qualité contribue non seulement à répondre aux besoins relatifs à la consommation humaine, mais peut aussi être utilisé pour assurer une meilleure sécurité alimentaire. La place centrale de l'eau douce fait en sorte que les technologies de dessalement ont des répercussions positives sur plusieurs aspects sociaux. Toutefois, des impacts sociaux négatifs entourent aussi ces enjeux. Les deux principaux enjeux qui seront traités dans le cadre de cette analyse seront les impacts sur la santé humaine et l'acceptabilité sociale.

5.3.1 Santé humaine

Certains risques par rapport à la santé humaine sont associés directement à l'eau issue des installations de dessalement. Bien que ces installations aient pour but de retirer presque tous les contaminants naturels de l'eau d'alimentation, certaines substances ne sont pas aussi facilement filtrées par les technologies. Aussi, les réactions chimiques entre les molécules présentes dans l'eau et les produits chimiques ajoutés durant le prétraitement ou le post-traitement peuvent créer des sous-produits. Tout d'abord, l'entretien des installations de dessalement nécessite l'utilisation de produits chimiques afin d'assurer la durabilité et l'efficacité des installations. Il est important que des mesures soient mises en place afin d'éviter que les résidus des produits utilisés se retrouvent dans l'eau dessalée à la suite de son passage dans les installations de dessalement. (OMS, 2011)

Les procédés membranaires et les procédés thermiques sont efficaces pour filtrer les produits inorganiques et les produits organiques ayant un poids moléculaire élevé. Les produits chimiques volatils sont éliminés par les effluents gazeux des procédés thermiques. Toutefois, les procédés membranaires peuvent ne pas être en mesure de filtrer le bore naturellement présent dans l'eau salée principalement sous forme de dihydrogène borate (H_2BO_3^-) ainsi que d'autres composés organiques volatils en fonction de la qualité et de la performance de la membrane. Cela signifie que lors du passage de l'eau d'alimentation dans le traitement par membrane, il y a une possibilité que certains virus passent par les membranes ce qui requiert un traitement spécifique lors du post-traitement afin de s'assurer de désactiver les virus en question. De plus, la dégradation des membranes peut engendrer le passage de certains agents pathogènes. (OMS, 2011; OMS, 2017) Ces enjeux peuvent être contrôlés par l'utilisation d'un post-traitement de désinfection efficace,

soit à base de chlore ou à base de procédés alternatifs comme l'ozone ou la lumière ultraviolette (UV) ainsi que par l'entretien adéquat des membranes. Toutefois, il est important de limiter la quantité de produits chimiques introduits dans l'eau durant l'étape de la désinfection afin d'éviter la formation de sous-produits organiques, comme l'anion bromate (BrO_3^-). La technologie de dessalement par électrodialyse inversé ne permet pas de filtrer les agents pathogènes de l'eau d'alimentation. Cette technologie est donc rarement considérée comme traitement lorsqu'il est question de produire de l'eau destinée à la consommation humaine. (OMS, 2011)

En fonction de la qualité des membranes utilisées, la technologie de l'osmose inverse peut avoir de la difficulté à retirer le bromure (Br^-) de l'eau d'alimentation. Lorsque l'eau contenant une bonne quantité de bromure subit un processus d'ozonation, d'oxydation ou d'électrolyse pour former des hypochlorites, il y aura formation de bromate (BrO_3^-) probablement au-delà des normes de qualité issues par l'OSM. (OMS, 2011; OMS, 2017) Ces techniques ne sont donc pas recommandées. Les études démontrent que le bromate est une matière cancérigène chez les rats et les souris. Toutefois, aucune donnée n'est disponible sur les effets de cette matière sur les êtres humains. (OMS, 2011)

Évidemment, la qualité de l'eau utilisée lors de la reminéralisation est importante afin d'éviter l'introduction de contaminants et d'agents pathogènes puisque la quantité résiduelle d'agents désinfectants présente dans l'eau dessalée ne permettrait bien souvent pas de lutter contre les agents pathogènes introduits. Cela peut être fait en s'assurant que la source d'eau utilisée pour le mélange soit traitée et qu'elle remplisse des critères de qualité préétablis. Toutefois, aucune norme spécifique à l'égard de la qualité de l'eau utilisée à des fins de mélange lors de la minéralisation de l'eau salée n'est disponible. Un enjeu similaire est présent quant à la formation de sous-produits à la suite du mélange de l'eau dessalée à une source d'eau extérieure lors de la distribution. L'eau utilisée comme source d'eau pour le mélange doit être choisie avec prudence. Des irrégularités dans les caractéristiques de l'eau de mélange utilisée pourraient altérer le goût de l'eau produite, altérer la perception des consommateurs sur la qualité de l'eau ou encore faire en sorte que l'eau ne respecte plus les lignes directrices pour une eau potable de qualité produite par l'OMS. Par exemple, si la quantité d'eau salée utilisée est plus grande qu'environ 1 % de la quantité d'eau totale, la qualité de l'eau produite pourrait être altérée par l'introduction d'une quantité trop élevée de sels dissous. Aussi, il est important de vérifier que les minéraux ajoutés à l'eau dessalée le soient en quantité adéquate et qu'ils n'introduisent pas de nouveaux contaminants pouvant affecter la qualité de l'eau. (OMS, 2011)

Le sodium, le potassium, le magnésium et le calcium sont des minéraux essentiels à la santé humaine. Toutefois, il n'y a pas de lignes directrices par l'OMS quant à la concentration que devrait contenir l'eau potable. Il est recommandé de consommer environ 10 000 mg de sodium/jour et plus de 3 000 mg de potassium/jour. Le sodium se trouve dans notre alimentation au quotidien. L'eau potable contient environ 200 – 250 mg/l de sodium. Quant à lui, le potassium présent dans l'eau salée est d'environ 450 mg/l. Toutefois, il est retiré presque en totalité lors du processus de dessalement. Le magnésium et le calcium sont aussi présents en grande quantité dans l'eau salée. Ils sont les principales composantes de ce qui définit

« l'eau dure ». Toutefois, tout comme le potassium, ils sont presque entièrement retirés lors des processus de dessalement. Le processus de reminéralisation de l'eau issu du dessalement permet d'ajouter des minéraux comme le magnésium et le calcium. Le magnésium et le calcium sont importants pour réduire respectivement les maladies du cœur et l'ostéoporose. Bien que la source principale de nutriments et de minéraux se fait par le biais de la nourriture, l'eau peut être une source complémentaire qui peut aider à contrer les régimes alimentaires faibles en calcium et en magnésium. Il peut s'avérer une bonne idée d'ajouter du calcium et du magnésium dans l'eau dessalée, en particulier lorsque la source d'eau douce antérieure avait une teneur élevée de ces minéraux. Les études démontrent que seuls certains minéraux sont présents en quantité suffisante dans l'eau douce provenant de sources naturelles pour parfois constituer un réel supplément, soit le calcium, le magnésium, le sélénium, le fluorure, le cuivre et le zinc. Toutefois, de tels ajouts doivent être effectués à la suite de la consultation avec des spécialistes de la santé et en fonction de chaque situation. (OMS, 2011) L'OMS a mandaté un groupe d'experts pour qu'il étudie le lien de causalité entre les conséquences potentielles sur la santé humaine et la consommation d'eau potable produite à partir de technologies de dessalement, soit une eau ayant une faible concentration en minéraux. L'hypothèse d'un lien de causalité entre une eau faible en minéraux et les conséquences négatives sur la santé humaine reste controversée. Les données disponibles ne permettent pas d'établir un lien de causalité concluant entre les effets négatifs sur la santé et l'eau douce faible en minéraux. Toutefois, elles permettent de conclure en une association négative entre l'eau douce faible en magnésium et le taux de mortalité lié aux maladies cardiovasculaires. (OMS, 2011)

De plus, l'utilisation d'un agent antimousse dans les technologies de distillation thermique afin de contrôler la quantité de mousse dans le processus dans le but de maintenir une efficacité opérationnelle élevée pourrait poser des problèmes de santé chez les humains. En effet, il a été constaté par des études effectuées que l'exposition à long terme à un agent antimousse causent des lésions hépatiques chez les rats. (Duan et al., 2019)

À la lumière de l'information disponible, il est évident qu'il y a un manque de connaissances et d'encadrement des pratiques de dessalement au niveau international, notamment lorsqu'il est question de norme de qualité face à l'eau douce issue des technologies de dessalement, et ce, autant pour la consommation domestique que pour l'agriculture. (Chen et al., 2015; Martinez-Alvarez, Martin-Goriz et Soto-Garcia, 2016) En effet, les normes internationales de l'OMS s'appliquent pour tout type d'eau potable sans distinction avec l'eau potable produite par dessalement. Bref, autant la législation internationale que nationale entourant l'eau douce devraient être revues afin de s'adapter à la réalité des technologies de dessalement, notamment en prenant en considération les enjeux spécifiques relatifs à la santé. Par exemple, avec l'arrivée de l'eau dessalée, il serait pertinent d'encadrer les concentrations maximales permises, ainsi que les concentrations minimales. (Speckhahn, S. et Isgren, E., 2019).

5.3.2 Acceptabilité sociale

Les technologies de dessalement ne font habituellement pas l'objet d'opposition sociale ou de conflit avec d'autres sources d'eau dans les régions où la quantité en eau douce disponible est insuffisante. Toutefois, même si l'eau dessalée respecte les normes de qualité pour être considérée de l'eau potable, il peut parfois y avoir des problèmes d'acceptabilité sociale face à certaines facettes de l'eau douce issue du dessalement. En effet, en fonction de la concentration en sels dissous présents dans l'eau, l'eau produite par dessalement peut subir une variation dans son goût et sa couleur lors de son entreposage et de son acheminement. Bien que n'ayant pas de conséquence connue sur la santé humaine, il peut être difficile de faire comprendre à la population la raison du changement dans le goût et la couleur de l'eau. (OMS, 2017) Notamment, comme mentionnée précédemment, une eau à faible teneur en sels dissous peut avoir un goût plat qui dérange certains consommateurs. Aussi, une eau déminéralisée peut avoir comme effet de donner l'impression aux consommateurs de recevoir une eau de moins bonne qualité. Cela a, entre autres, été le cas en Norvège, à Gotland, où les consommateurs se posaient des questions sur les effets d'une eau déminéralisée sur leur santé. (Speckhahn, S. et Isgren, E., 2019)

Aussi, plusieurs s'interrogent sur les impacts environnementaux des technologies de dessalement et sur les impacts sociaux qu'engendre la production d'eau douce supplémentaire au lieu de se concentrer sur une gestion optimale des ressources en eau douce disponibles. Certaines personnes soutiennent qu'utiliser des solutions augmentant la quantité totale d'eau douce disponible ne fera qu'augmenter le problème de la demande en eau douce. Ils soutiennent qu'au lieu d'augmenter la quantité d'eau douce disponible, le but est de repenser notre système de consommation et d'utilisation de l'eau douce afin de retirer plus de bénéfices pour chaque unité d'eau douce utilisée (Speckhahn, S. et Isgren, E., 2019). Certains s'opposent à l'utilisation des technologies de dessalement en raison des impacts environnementaux potentiels entourant la consommation énergétique élevée et la gestion des rejets de saumure. Entre autres, certaines méthodes de gestion des rejets, comme les bassins d'évaporations, sont vues négativement par la population principalement dû au potentiel de contamination des écosystèmes aquatiques et terrestres avoisinants et aux odeurs déplaisantes. (Ladewig et Asquith, 2012)

5.3.3 Capacité à répondre à la demande des différents secteurs

Actuellement, les technologies de dessalement ont le potentiel de répondre à la demande en eau douce pour la consommation humaine. Il est incertain si les installations de dessalement construites dans le futur auront la capacité de répondre à la demande en eau douce du secteur industriel et du secteur agricole. Le dessalement de l'eau ne peut pas remplacer les précipitations naturelles. Cet outil ne peut donc pas répondre à la demande en eau des écosystèmes naturels qui sont dépendants des précipitations. (Speckhahn, S. et Isgren, E., 2019).

Aussi, la qualité de l'eau utilisée pour des fins d'irrigation dépend du type de culture. Certaines cultures sont plus sensibles à la conductivité de l'eau et à sa concentration en sels que d'autres. Par exemple, la culture

des tomates est une des cultures qui tolère le mieux une concentration élevée de sels dans l'eau d'irrigation. Des économies en eau douce peuvent être possible en utilisant de l'eau saumâtre à faible concentration en sels dissous pour l'irrigation de cultures pouvait tolérer une salinité plus élevée. (Aznar-Sanchez, Belmonte-Urena, Velasco-Munoz et Valera, 2019)

5.4 Innovation pour répondre aux enjeux environnementaux

L'expansion rapide des installations de dessalement ne vient pas sans sa dose de problèmes. Comme mentionné dans la section 5.3, le dessalement de l'eau comporte plusieurs enjeux. La conception initiale inadéquate ainsi que les conditions d'exploitation sont souvent la cause des enjeux entourant le dessalement de l'eau. Une installation de dessalement a besoin de trois éléments essentiels : une source d'énergie, un procédé de dessalement et un système de gestion des rejets de saumure. (Kurihara, M. et Takeuchi, H., 2019) La considération de ces éléments dans la conception de l'installation en fonction des caractéristiques spécifiques du milieu devrait grandement minimiser les risques associés à la production d'eau par dessalement. La présente section tend à présenter quelques pistes de solutions afin de répondre, principalement, aux enjeux environnementaux reliés aux 3 éléments essentiels d'une installation de dessalement.

5.4.1 Diminution de l'utilisation de produits chimiques

Typiquement, l'ajout d'un agent stérilisant est commun lors du prétraitement dans les installations de dessalement utilisant un procédé membranaire afin de réduire la quantité de matières organiques passant par les membranes et d'ainsi éviter leur encrassement. Toutefois, puisque l'utilisation de produits chimiques peut avoir des répercussions néfastes sur l'environnement, sur la santé et sur la durée de vie des membranes des études sont menées afin de trouver des solutions alternatives. (Kurihara, M., Takeuchi, H. et Ito, Y, 2018) Elles ont, entre autres, démontré que l'utilisation intermittente d'un agent stérilisant comme le chlore est plus efficace qu'une utilisation continue. En effet, les données indiquent qu'à long terme le chlore serait en fait une des causes augmentant l'encrassement biologique des membranes en raison du comportement des microorganismes lorsqu'ils sont exposés au chlore. Un projet spécial mené par le Japon tend à éclaircir le lien entre l'encrassement biologique et l'ajout de produits chimiques. Les résultats d'expérimentations scientifiques ont permis aux initiateurs du projet de conclure qu'une installation de dessalement membranaire sans prétraitement au chlore a moins d'impacts négatifs à long terme sur l'encrassement biologique des membranes. En d'autres termes, l'utilisation de chlore augmente la vitesse de formation du biofilm sur les membranes et donc de son encrassement. Cela a été démontré par le biais de leur technologie de monitoring de l'encrassement biologique, le mBFR. La figure 5.4 présente les résultats d'un exercice de monitoring. Les lignes rouges représentent la vitesse de l'encrassement biologique lorsqu'il y a l'ajout de chlore tandis que les lignes bleues représentent la vitesse de l'encrassement biologique lorsqu'un prétraitement sans agent stérilisant est ajouté. (Kurihara, et al., 2018)

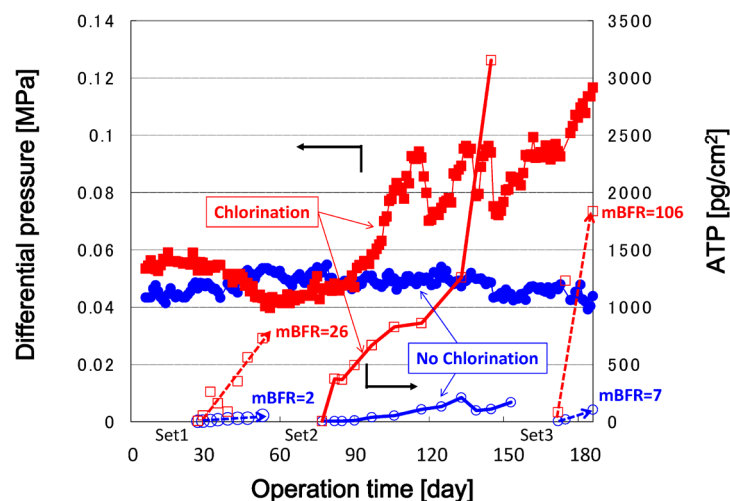


Figure 5.4 Résultats de la technique de monitoring de l'encrassement biologique : mBFR (inspiré de : Kurihara, 2018)

Afin de vérifier l'efficacité de cette technique de monitoring, un projet pilote d'un an a été mené avec succès dans une installation de dessalement ayant une capacité de production d'eau dessalée de 500 m³/jour située au Moyen-Orient et étant alimenté avec de l'eau ayant une grande salinité. Le prétraitement adéquat pour prévenir l'encrassement biologique doit être déterminé en fonction des particularités de chaque installation, incluant le type d'eau d'alimentation et la vitesse d'encrassement biologique des membranes. (Kurihara et al., 2018)

5.4.2 Gestion des rejets de saumure

La gestion durable des rejets de saumure et d'eau usée est un enjeu majeur relié aux technologies de dessalement. La mauvaise gestion de ces rejets est à la source d'impacts environnementaux négatifs engendrés autant par leur salinité élevée que par les produits chimiques ajoutés durant le processus de dessalement. Les impacts affectent principalement les écosystèmes aquatiques et les sources d'eau douce qui peuvent être polluées. (Wenten, Khoiruddin, Aryanti et Hakim, 2016)

L'eau dessalée peut être mélangée à une source d'eau douce conventionnelle ou à une petite dose d'eau salée afin d'équilibrer les minéraux qu'elle contient. La même option est possible pour les rejets de saumure, mais cette fois-ci, le but du mélange est de diluer les rejets afin de réduire leur salinité ou leur température. Les rejets peuvent être mélangés à de l'eau issue d'usines de traitement d'eau usée ou à l'eau utilisée par les centrales électriques comme eau de refroidissement. Ce mélange a pour but de minimiser les impacts négatifs potentiels des rejets. (Giwa, Dufour, Al Marzooqi, Al Kaabi et Hasan, 2017) Il est possible de combiner une usine de dessalement à une usine de traitement des eaux usées ou à une centrale électrique.

Plusieurs recherches récentes portent sur la création d'un traitement à apposer aux rejets de saumure dans le but de minimiser leurs effets négatifs potentiels sur l'environnement et sur la création de solutions d'économie circulaire pour valoriser les rejets de saumure au lieu de les traiter en déchet ultime. Cela

permettrait de réduire les frais associés à leur gestion durable ainsi que de créer des opportunités économiques. (Morillo et al., 2014; Wenten et al., 2017; Sánchez, Nogueira et Kalid, 2015) Plusieurs projets sont en développement afin de transformer les rejets de saumure en opportunités économiques. Notamment, des techniques comme l'électrodialyse bipolaire à membrane permettent de réutiliser les rejets en les transformant en produits acides et en produits basiques comme le NaOH et le HCl et d'ainsi créer des produits alternatifs (Ibáñez, Pérez-González, Gómez, Urtiaga, et Ortiz, 2013; Morillo et al., 2014). Aussi, la récupération des métaux rares contenus dans les rejets de saumure, comme l'uranium, permet de réduire l'impact environnemental des rejets et l'impact environnemental de l'exploitation minière en récupérant et en réutilisant ces métaux rares. (Loganathan, Naidu et Vigneswaran, 2017; Morillo et al., 2014) Toutefois, la demande en énergie et le coût associé à un tel traitement présentent un frein au déploiement de cette pratique. (Kaplan, Mamrosh, Salih et Dastgheib, 2017) Certains auteurs suggèrent d'utiliser les rejets de saumure dans le domaine de l'agriculture et de l'aquaculture en se basant sur le système de séquences de concentration biologique. Ce système permet de recycler les rejets salés par leur intégration à l'eau de l'aquaculture. (Qadir, Noble, Karajeh et George, 2015) Lorsqu'utilisée avec les bons types de culture, l'utilisation des rejets de saumure peut engendrer l'augmentation de la productivité de la biomasse allant jusqu'à 300 %. (International center for biosaline agriculture [ICBA], 2018) C'est, entre autres, le cas pour la spiruline, une espèce d'algue couramment utilisée comme supplément alimentaire qui répond bien à l'intégration des rejets de saumure dans l'aquaculture. (Mahmoudi, Ghaffour, Goosen et Bundschuh, 2017; Sánchez et al., 2015). Les rejets de saumure peuvent aussi être utilisés pour produire de l'électricité par osmose directe. (Qadir et al., 2015)

5.4.3 Augmentation du taux de récupération de l'eau

Dans un monde où la quantité d'eau dessalée augmente constamment, le seul moyen de réduire la quantité de rejets produit est d'augmenter le taux de récupération des installations de dessalement. Cela résultera en une plus grande quantité d'eau dessalée et une plus petite quantité de saumure à une concentration en sels dissous plus élevée. (Jones et al., 2019) L'augmentation du taux de récupération apporte des enjeux relatifs à l'augmentation de la quantité d'énergie nécessaire et de la concentration en sels dissous des rejets. La détermination du taux de rendement devrait se faire sur la base du cas par cas afin de considérer l'ensemble des enjeux économiques, sociaux et environnementaux entourant une installation de dessalement. (Jones et al., 2019)

Depuis quelques années, les investissements ont pris de l'ampleur quant au développement de technologies intégrant une nouvelle stratégie de gestion des rejets de saumure qui consiste à récupérer tout rejet liquide réutilisable et à optimiser l'usage de l'eau, soit la stratégie « aucun rejet liquide » (traduction libre : Yaqub et Lee, 2019). Cette stratégie a pour but de réduire les risques environnementaux reliés aux rejets de saumure et de réduire la quantité d'eau d'alimentation nécessaire pour produire une unité d'eau dessalée. Toutefois, son coût d'exploitation élevée, la quantité d'énergie nécessaire à son fonctionnement et la gestion des déchets solides, soit un mélange de sels, sont des limites importantes au déploiement de

ce type de technologie. Cette stratégie de gestion a énormément de potentiel. Toutefois, des études sur le cycle de vie ainsi qu'une analyse coûts-bénéfices environnementaux sont nécessaires afin de déterminer les réels risques et bénéfices de cette stratégie. (Tong et Elimelech, 2016; Yaqub et Lee, 2019)

5.4.4 Énergies renouvelables et efficacité énergétique

Un des enjeux principaux au déploiement du dessalement de l'eau à grande échelle est la grande consommation énergétique des technologies de dessalement. D'une part, l'utilisation des technologies de dessalement dans les régions éloignées est souvent restreinte en raison de l'absence de sources d'énergie fiables. D'autre part, l'énergie nécessaire à la production d'eau douce engendre l'émission de GES et la pollution de l'air qui sont en partie responsables des changements climatiques qui à leur tour sont en partie responsables de la crise de l'eau. L'utilisation de sources d'énergies renouvelables pour l'exploitation des installations de dessalement est une solution qui permet de répondre à ces deux problématiques. (Mahmoudi et al., 2017) Comme l'illustre la figure 5.5, plusieurs sources d'énergies renouvelables sont disponibles : l'énergie des vagues, l'énergie des marées, l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'hydroélectricité ou l'énergie géothermique.

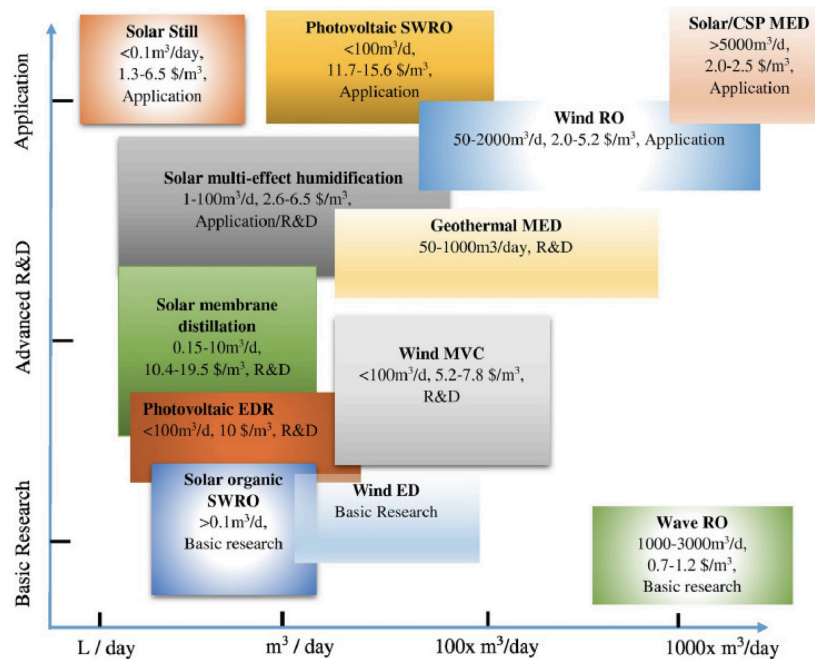


Fig. 4. Technological status of renewable energy desalination technologies [19].

Figure 5.5 Technologies d'énergie renouvelable utilisée avec des technologies de dessalement (tiré de : Ahmed, Hashaikeh et Hilal, 2019)

Selon les caractéristiques du milieu, les différents types d'énergie renouvelable ont leurs aspects positifs et leurs inconvénients. La sélection du type d'énergie à utiliser devrait se faire en fonction des trois critères suivants : le type d'eau d'alimentation, le type de technologie de dessalement utilisée et la quantité d'eau à

produire pour répondre à la demande. Une analyse approfondie devrait être faite en fonction de chaque cas spécifique puisqu'une bonne combinaison de technologie de dessalement, de type d'énergie renouvelable et de type d'eau d'alimentation permet une optimisation des ressources et une diminution des impacts négatifs liés au dessalement de l'eau. (Mahmoudi et al., 2017)

Actuellement, les technologies de dessalement utilisant une source d'énergie renouvelable ne sont pas compétitives d'un point de vue économique par rapport aux technologies utilisant des sources d'énergie conventionnelles. Toutefois, les énergies renouvelables restent une avenue intéressante pour répondre à la demande en énergie des technologies de dessalement. Entre autres, l'énergie solaire fait l'objet d'un grand nombre d'études puisqu'elle est la source d'énergie la plus abondante sur Terre. Quelques études dénotent que plusieurs régions arides qui ont peu de ressources conventionnelles en eau douce ont un grand taux de radiations solaires. L'utilisation de l'énergie solaire pour l'exploitation des installations de dessalement a donc un fort potentiel dans ces régions. De plus, des études estiment que d'ici 2030, le coût de l'eau dessalée produite par osmose inverse et alimentée par une source d'énergie renouvelable sera sensiblement le même que le coût actuel de l'eau dessalé produit par osmose inverse et alimenté par des combustibles fossiles. (Ahmed et al., 2019)

Le recours aux énergies renouvelables offre la possibilité d'avoir une source d'énergie qui ne dépend pas de l'approvisionnement extérieur en intrant. Bien souvent, les villes situées dans les pays en développement n'ont pas accès à un système électrique fiable. L'intégration d'un système de dessalement à partir d'énergies renouvelables pourrait apporter des opportunités socio-économiques intéressantes et augmenter la qualité de vie des populations qui vivent dans des régions urbaines en développement. (Mahmoudi et al., 2017) Aussi, l'utilisation de sources d'énergie renouvelable permet la création d'unité de dessalement mobile et indépendante. Ce genre d'installation s'intègre bien pour répondre aux besoins en eau douce dans les milieux ruraux éloignés, sur les petites îles et dans les régions côtières. C'est aussi un outil d'adaptation possible pour répondre aux catastrophes naturelles affectant les ressources en eau douce disponibles. D'ailleurs, l'Institut de technologie des îles Canaries a récemment conçu une unité mobile de dessalement facile d'entretien, MORENA. Cette unité mobile utilise la technologie de l'osmose inverse et est alimentée par un système énergétique hybride, soit une combinaison entre l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. Notamment, l'unité mobile MORENA est utilisée dans un petit village de Tunisie, Ksar Guilenne, qui est située à 150 km d'une couverture électrique et à 60 km d'une source d'eau douce. (Mahmoudi et al., 2017) Aussi, une entreprise québécoise, ONEKA Technologies, a conçu une unité de dessalement pour répondre aux besoins en eau de petites communautés. Leur unité est conçue sous forme de bouée placée directement dans la mer ou dans l'océan comme il est possible de le constater sur la figure 5.6. (ONEKA, 2019)



Figure 5.6 Unité de dessalement conçu par ONEKA Technologies (tiré de : ONEKA, 2019)

Les unités sont entièrement indépendantes puisqu'elles sont alimentées par l'énergie des vagues. Chaque bouée est théoriquement en mesure de produire jusqu'à 10 m^3 d'eau douce par jour si elle est placée dans les conditions adéquates. La hauteur optimale des vagues est entre 1 et 3 m. Cette unité utilise la technologie de l'osmose inverse pour produire de l'eau potable et l'achemine sur la terre ferme dans le biais d'un système de distribution. L'eau dessalée est ensuite acheminée sur la terre par un système d'alimentation. Bien entendu, pour que cette technique soit efficace, il faut que les bouées soient placées à des endroits stratégiques où la hauteur des vagues est assez grande pour produire l'énergie nécessaire au processus de dessalement. Cette technologie innovatrice est maintenant en phase de commercialisation depuis la fin de l'année 2018 suite à un investissement de 2 millions \$ CAD. Leur premier marché cible : les Caraïbes. Les initiateurs de ce projet pensent se démarquer de leurs compétiteurs en raison des coûts économiques plus faibles associés à leur technologie qui pourrait faire économiser jusqu'à 70 % de la facture en eau des utilisateurs. Aussi, ils décrivent leur invention comme étant respectueuse de l'environnement. (ONEKA, 2019) Il sera intéressant de voir l'évolution de cette unité de dessalement afin de déterminer si elle répond aux prétentions de l'entreprise quant à son faible impact sur l'environnement et son faible coût économique.

Outre l'utilisation de sources d'énergies renouvelables pour alimenter les installations de dessalement, il existe plusieurs solutions afin de maximiser l'efficacité énergétique des installations et de diminuer les coûts d'exploitations. (Mahmoudi et al., 2017) Entre autres, il est possible de :

- Combiner une usine de dessalement de l'eau de mer avec une usine de production d'énergie. Par exemple, la vapeur d'eau qui sort des turbines à la suite de la production d'énergie peut être récupérée et utilisée comme eau douce au lieu d'être perdue dans une usine traditionnelle;
- Favoriser le développement des technologies de dessalement à faible consommation énergétique comme la distillation sur membrane (MD) et le dessalement par absorption (AD);
- Produire de l'eau douce par lot afin de minimiser la nécessité d'entreposer l'énergie;
- Utiliser la technologie de l'osmose inverse à capacité progressive afin de limiter l'utilisation de batteries, et de;

- Connecter l'installation à une source d'énergie conventionnelle afin de l'utiliser comme source d'énergie secondaire. (Mahmoudi et al., 2017)

Il suffit d'investir dans le développement d'installation de dessalement qui permettent de répondre à la demande en eau douce tout en ne contribuant pas au réchauffement planétaire, soit en utilisant des sources d'énergie renouvelables.

5.4.5 Cas du Japon : le projet *Mega-ton Water system*

Pour répondre aux problématiques précédemment établies, le Japon a lancé un projet de recherche afin de trouver les éléments essentiels à une technologie de dessalement adapté aux conditions du milieu et à la demande, soit le projet *Mega-ton Water System*, un système capable de produire au moins 100 000 m³ d'eau dessalée par jour. Le projet du Japon a été mené dans le but de développer un système de dessalement de l'eau qui est capable de répondre à la demande en eau du 21^e siècle de façon durable. Afin d'y arriver, le projet visait à créer un système qui réduit de 20 % à 30 % la consommation d'énergie, qui a un faible impact sur l'environnement (par exemple, sans chlore), qui permet de produire de l'eau douce à un faible coût, qui a un haut taux de récupération d'eau et qui est fiable. Cela a mené à la création de six technologies novatrices afin de concevoir une installation de dessalement qui est durable et économiquement viable. Celles-ci sont présentées dans la figure 5.7. (Kurihara et Takeuchi, 2018) Des projets pilotes sont en cours afin de confirmer l'efficacité de ces technologies.

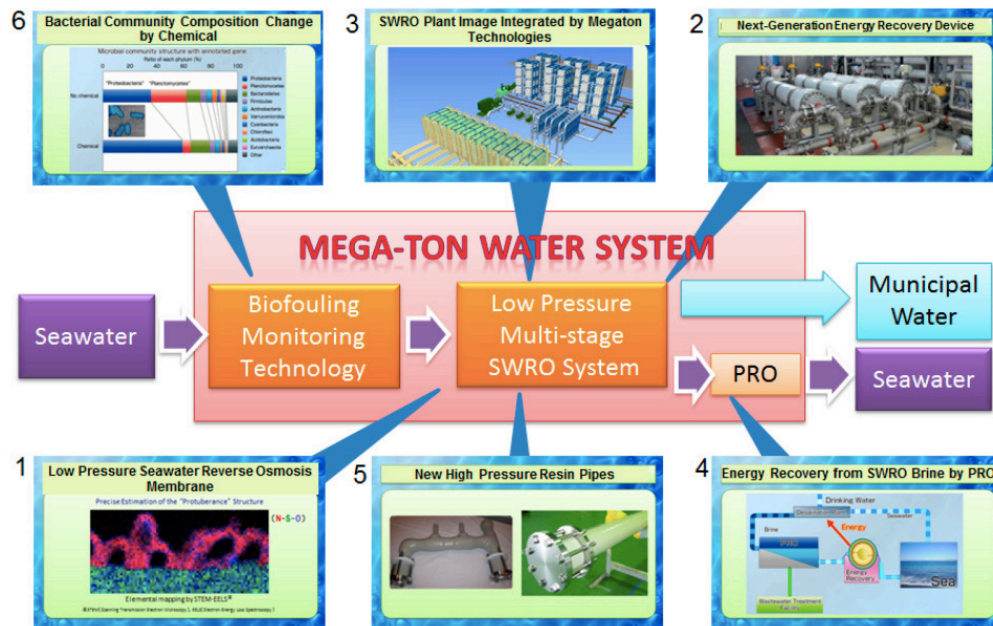


Figure 3. Outputs of "Mega-ton Water System" as six indispensable technologies for the 21st century.

Figure 5.7 Technologies développées pour la création d'une installation de dessalement durable et économiquement viable (adapté de : Kurihara et Takeuchi, 2018)

6 ANALYSE DU DESSALEMENT DE L'EAU COMME OUTIL D'ADAPTATION

Les sections précédentes ont permis d'établir le lien entre les changements climatiques et la raréfaction des ressources en eau douce. Elles ont aussi présenté la place du dessalement de l'eau comme outil d'adaptation possible et son importance pour répondre à la crise de l'eau ainsi que les principales technologies de dessalement présentement utilisées. Pour terminer, les freins au déploiement à grande échelle de cet outil d'adaptation ont été présentés, soit les enjeux environnementaux, sociaux et économiques qui entourent le dessalement de l'eau ainsi que des pistes de solutions pour répondre à ces enjeux.

Dans un premier temps, à partir de l'information présenté dans les chapitres un à cinq, le présent chapitre va cibler les populations vulnérables face aux changements climatiques qui affectent les ressources en eau douce, soit les populations qui ont besoin d'un outil d'adaptation comme le dessalement de l'eau pour répondre à leur besoin en eau douce. Dans un deuxième temps, il va analyser le dessalement de l'eau comme stratégie d'adaptation potentielle pour les populations vulnérables face aux changements climatiques qui affectent les ressources en eau douce, le tout dans une perspective de développement durable. Pour ce faire, les différents enjeux entourant le dessalement de l'eau qui ont été soulevés précédemment ainsi que les possibles solutions afin de gérer durablement ces enjeux seront analysés en fonction des trois sphères du développement durable. Le but de l'analyse est de déterminer si le dessalement de l'eau est une solution adéquate pour répondre aux besoins des populations vulnérables ainsi que de déterminer si les impacts négatifs entourant cette solution peuvent être minimisés et gérer durablement de manière à limiter les répercussions négatives générées par le dessalement de l'eau.

6.1 Populations vulnérables

Le chapitre trois a permis d'établir les effets des changements climatiques sur le cycle de l'eau qui affecteront les ressources en eau douce de différentes régions du monde. Il ressort des données disponibles qu'autant des pays développés, des pays du BRICS et des pays en développement verront leur stress hydrique s'intensifier, entre autres, à cause des effets des changements climatiques.

Le tableau 6.1 fait état des 74 pays qui seront possiblement les plus touchés par les changements climatiques affectant les ressources en eau douce à l'horizon 2040 suivant le scénario du *statu quo* établi par le *World Resources Institute*, soit une combinaison entre le scénario RCP8.5 et le scénario SSP2 proposés dans le 5^e rapport du GIEC (Luo et al., 2015). Ces pays représentent donc des populations vulnérables dans le cadre de cette analyse. Elles se situent autant à l'intérieur des terres que dans des États insulaires ou dans des régions côtières. En raison de leur situation sociale et économique, les populations vulnérables situées dans des pays en développement subiront davantage les impacts négatifs de la raréfaction des ressources en eau douce (GIEC, 2014a; Oxfam, 2018; UNESCO, 2019a).

Tableau 6.1 Prévision des populations vulnérable face aux changements climatiques affectant les ressources en eau douce à l’horizon 2040 (inspiré de : Luo et al., 2015).

Niveau du stress hydrique à l’horizon 2040	Ratio des prélèvements d’eau sur l’eau disponible (%)	Pays
moyen élevé	20 – 40	Botswana, Érythrée, Kosovo, Cuba, Moldavie, Luxembourg, George, Argentine, Pays-Bas, Eswatini, Corée du Sud, Royaume-Uni, Lituanie, France, Japon, Népal, Pologne.
élevé	40 – 80	Mexique, République dominicaine, Estonie, Mongolie, Belgique, Italie, Inde, Andorre, Monaco, Australie, Portugal, Tadjikistan, Sri Lanka, États-Unis, Chine, Albanie, Haïti, Indonésie, Ukraine, Afrique du Sud, Namibie, Pérou, Timor-Leste, Philippines.
très élevé	> 80	Bahrein, Kuweit, Qatar, San Marino, Singapoure, Émirats arabes unis, Palestine, Israël, Arabie Saoudite, Oman, Liban, Kyrgyzstan, Iran, Jordan, Libye, Yémen, Macédoine, Azerbaijan, Maroc, Kazakhstan, Iraq, Arménie, Pakistan, Chili, Syrie, Turkmenistan, Turquie, Grèce, Uzbekistan, Algérie, Afghanistan, Espagne, Tunisie.

6.2 Capacité d’augmenter la résilience des populations vulnérables

Le but d’introduire un outil d’adaptation est d’augmenter la résilience d’une population et de réduire leur vulnérabilité face à un risque, ici la pénurie d’eau. En fonction de l’ensemble des informations disponibles, il est possible de conclure que le dessalement de l’eau a la capacité d’augmenter la résilience des populations vulnérables face aux changements climatiques affectant les ressources en eau douce (UNFCCC, 2020b). Les technologies de dessalement ont la capacité de produire une eau douce de qualité à partir d’une source d’eau trop salée pour la plupart des utilisations qui n’est pas dépendante du climat. Elles sont aussi très polyvalentes ce qui est un grand avantage en raison de l’hétérogénéité des populations vulnérables.

En effet, la section 6.1 permet de constater que la vulnérabilité face à la ressource en eau douce est universelle, c’est-à-dire qu’elle touche autant des pays développés que des pays en développement et autant des îles et des régions côtières que des pays à l’intérieur des terres (Luo et al., 2015). Il ressort de l’ensemble de l’information analysée que les technologies de dessalement ont la capacité de produire de petites et de grandes quantités d’eau douce en fonction de la capacité de l’installation (Jones et al., 2019). De petites installations développées par des compagnies comme ONEKA sont capables de produire des quantités d’eau dessalée aussi petites que 10 m³/jour tandis que d’autres projets comme le projet développé par le Japon, le *Mega-ton Water system*, visent à construire des installations capables de répondre à des

demandes en eau douce allant jusqu'à 100 000 m³ d'eau dessalée/jour (ONEKA, 2019; Kurihara et Takeuchi 2018) Les différentes possibilités qu'apportent les technologies de dessalement font d'elles un outil pouvant prendre plusieurs formes. Il est donc possible d'intégrer un système de dessalement d'eau en fonction des contraintes et des besoins spécifiques d'un milieu.

Les technologies de dessalement sont d'autant plus intéressantes lorsqu'elles sont associées à une source d'énergie renouvelable puisque cela réduit considérablement leur impact sur l'environnement et elles ont la capacité d'être indépendante (Mahmoudi et al., 2017). Par exemple, dans une région, une ou plusieurs unités de dessalement mobiles fonctionnant à l'énergie renouvelable pourraient être disponibles pour répondre aux besoins en eau à la suite de catastrophes naturelles tandis que dans une autre région une installation de dessalement à grande capacité pourrait répondre aux besoins en eau douce d'une ville en développement.

6.3 Caractère durable de l'outil d'adaptation

L'eau est un élément essentiel au développement durable (ONU, s. d.a). Dans cette optique, il est important de s'assurer que l'utilisation du dessalement de l'eau comme outil pour répondre à la demande grandissante en eau douce n'aura pas de répercussions négatives démesurées sur l'environnement, la population et l'économie. Pour se faire, les sections suivantes vont tenter de déterminer si le dessalement de l'eau s'intègre dans certains objectifs du Programme de développement durable des Nations Unies (annexe 2) et si une gestion durable des enjeux entourant le dessalement de l'eau est possible et réaliste. Le tableau 6.2 résume les constats réalisés qui seront décrits en détails dans les sous-sections suivantes.

Tableau 6.2 Résumé de l'analyse du caractère durable de l'outil d'adaptation

Dimensions du développement durable	Enjeux	Solutions potentielles
Environnement	Émission de GES et changements climatiques	- Utiliser des sources d'énergies renouvelables.
	Destruction des écosystèmes aquatiques et terrestres	- Encadrer législativement la configuration des installations de dessalement, incluant la prise d'eau et la gestion des rejets de saumure. - Investir dans le développement de solutions de valorisation des saumures. - Enlever les produits chimiques du prétraitement et du post-traitement.
Économique	Coût de l'eau dessalée	- Investir dans le développement de technologies à faible coût. -Investir afin de rendre accessible l'eau dessalée aux populations vulnérables.
Social	Santé de la population	- Effectuer des études sur la qualité de l'eau dessalée et des effets réels sur la santé. - Développer un meilleur encadrement législatif entourant le dessalement de l'eau. - Enlever les produits chimiques du prétraitement et du post-traitement.
	Exploitation des installations de dessalement par la population locale	- Développer des installations de dessalement dont l'exploitation n'est pas trop complexe.
	Acceptabilité sociale	- Intégrer des normes de qualité. - Gérer durablement les enjeux environnementaux. - Utiliser de façon complémentaire le dessalement avec d'autres outils de gestion.

6.3.1 Gestion des enjeux environnementaux

Il est important de s'assurer qu'il est possible de faire une gestion durable des enjeux environnementaux entourant les technologies de dessalement afin de ne pas créer d'impacts négatifs supplémentaires sur les différents écosystèmes par l'utilisation de cet outil. À partir des informations recueillies dans les chapitres précédents, les principaux enjeux environnementaux entourant les technologies de dessalement ainsi que les solutions de gestion proposées seront analysés dans les sous-sections suivantes, soit les émissions de GES et les changements climatiques ainsi que la destruction des écosystèmes terrestres et aquatiques comme l'illustre le tableau 6.2. Le dessalement de l'eau peut avoir des répercussion négatives sur trois objectifs du Programme de développement durable des Nations Unies en lien avec l'environnement si une gestion des risques efficace entourant le dessalement de l'eau n'est pas réalisée. Comme il sera détaillé dans les prochaines sous-sections, les enjeux environnementaux concernant le dessalement de l'eau peuvent avoir des impacts négatifs sur les objectifs 13, 14 et 15 qui sont respectivement, « mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques », « vie aquatique » et « vie terrestre ». (ONU, s. d.a)

Émission de GES et changements climatiques

Le chapitre un a permis de dépeindre la relation entre les émissions de GES et les changements climatiques, entre la production d'énergie et les émissions de GES ainsi qu'entre la production d'énergie et les changements climatiques. Les chapitres deux et trois ont permis d'exposer l'incidence des changements climatiques sur la diminution de la quantité d'eau douce disponible tandis que les chapitres quatre et cinq ont permis de mettre en lumière la consommation énergétique associée à l'exploitation des technologies de dessalement qui est majoritairement soutenue par des énergies non renouvelables grandes émettrices de GES. L'ensemble de ces données ont permis de comprendre les interactions entre l'eau, l'énergie et les changements climatiques. Les émissions de GES associées à l'utilisation de sources d'énergies non renouvelables pour l'exploitation des installations de dessalement contribuent aux changements climatiques. La production d'eau par dessalement aide à combattre la crise de l'eau, mais contribue également à cette même crise lorsque la source d'énergie utilisée est non renouvelable. (Mahmoudi et al., 2017)

Bien que ce ne soit pas la norme actuellement, il est possible d'exploiter les installations de dessalement avec des sources d'énergies renouvelables. Le développement de combinaisons viables entre une source d'énergie renouvelable et une technologie de dessalement avance rapidement (Mahmoudi et al., 2017). Il est donc possible et accessible de créer des installations de dessalement zéro-émission. D'ailleurs, différentes unités de dessalement innovatrices propulsées par des sources d'énergies renouvelables sont développées et commercialisées à travers le monde, par exemple la technologie ONEKA et la technologie MORENA (Mahmoudi et al., 2017; ONEKA, 2019). Toutefois, pour l'instant, les sources d'énergies renouvelables ne sont pas économiquement compétitives par rapport aux sources d'énergie conventionnelles pour l'exploitation des installations de dessalement traditionnelles (Mahmoudi et al.,

2017). L'analyse des caractéristiques spécifiques du milieu lors de la conception de l'installation de dessalement permet d'optimiser les ressources et de réduire les impacts en choisissant le type d'eau d'alimentaire, le type d'énergie et le type de procédé le plus efficace (Kurihara et Takeuchi, 2018).

Destruction des écosystèmes aquatiques et terrestres

Les écosystèmes aquatiques et terrestres peuvent être affectés négativement par l'exploitation des installations de dessalement. D'une part, des enjeux entourent la prise d'eau d'alimentation, soit l'entraînement et la collision d'organismes marins. Ces phénomènes ont des impacts sur la population des espèces aquatiques dans les zones de prélèvement. (ONU, 2017) Les études suggèrent des solutions assez simples pour éviter ces problématiques. Afin de réduire les risques d'entraînement, il est recommandé de choisir un emplacement à l'écart des zones biologiquement productives, par exemple des prises situées dans des eaux profondes alors que pour réduire les risques de collision, il est recommandé d'utiliser une faible vitesse d'aspiration et d'installer des écrans de captation. (Elimelech et Phillip, 2011; ONU, 2017) Un encadrement normatif ou législatif restrictif concernant la configuration des installations de dessalement, incluant la prise d'eau, serait un moyen efficace de s'assurer de limiter les effets négatifs d'un mauvais positionnement d'une prise d'eau sur les écosystèmes marins.

D'autre part, une mauvaise gestion des rejets de saumure a des impacts négatifs sur l'environnement. L'ensemble des méthodes de gestion actuellement utilisées présente un risque face à l'augmentation de la salinité de l'écosystème entourant le lieu de gestion des rejets ainsi que concernant la contamination du lieu par les polluants contenus dans les rejets, notamment des métaux lourds et des produits chimiques. Entre autres, les variations dans la salinité ainsi que la pollution peuvent avoir des effets négatifs sur la survie et la croissance de la faune et de la flore aquatique. (ONU, 2017) Toutefois, la gestion durable des rejets de saumure n'est pas impossible. Plusieurs solutions ont été exposées dans les chapitres précédents afin de minimiser les risques et de les gérer efficacement. L'utilisation de produits chimiques durant les étapes du processus de dessalement peut être évitée en utilisant un prétraitement sans agent désinfectant qui est élaboré en fonction des conditions du milieu. Non seulement une telle option permet d'éviter l'utilisation de produits chimiques lors du prétraitement et du post-traitement, elle permet aussi de réduire les coûts d'exploitation associés aux produits utilisés lors de ces étapes. (Kurihara, et al., 2018) Si des produits chimiques sont utilisés lors du nettoyage des installations, il est important de s'assurer de l'absence de résidus de ces produits dans la machinerie. Il est aussi nécessaire de traiter ces eaux suivant les procédures de traitement des eaux usées avant de les rejeter dans l'environnement. Une telle méthode de gestion pour limiter la présence de produits chimiques limiterait aussi les impacts possibles sur les écosystèmes terrestres des rejets contenant des sous-produits comme le bore. (ONU, 2011) Outre la diminution de la quantité de rejets produits par l'augmentation du taux de récupération d'eau, les auteurs proposent plusieurs solutions de gestion durable des rejets de saumure, notamment des solutions intégrant l'économie circulaire en proposant la valorisation des rejets (Morillo et al., 2014; Sánchez, Nogueira et Kalid, 2015; Wenten et al., 2017). Plusieurs propositions ne sont pas économiquement viables comme l'extraction

des métaux rares ou la création de produits alternatifs comme des produits acides et des produits basiques (Ibáñez et al., 2013; Kaplan et al., 2017; Morillo et al., 2014). La stratégie de gestion « aucun rejet liquide » est prometteuse, mais comporte plusieurs limites à surmonter avant de pouvoir la déployer à grande échelle. L'utilisation des rejets de saumure en aquaculture afin d'augmenter la productivité de certaines espèces est une option intéressante pour les installations de dessalement produisant de petits volumes de rejets de saumure (Qadir et al., 2015). La gestion durable des rejets de saumure reste un enjeu important en raison du coût économique associé à leur valorisation.

La solution de diluer les rejets de saumure en les mélangeant à de l'eau moins salée, comme avec l'eau issue d'usines de traitement des eaux usées, afin de réduire l'écart entre la salinité des rejets et la salinité du milieu récepteur avant de les rejeter est couramment proposée (Giwa et al., 2017). Cette solution est économique réalisable et permet de relativement diminuer les risques associés au déchargement des rejets de saumure en eau de surface. Après analyse des différentes options de gestion des rejets, elle représente l'option de gestion la plus durable en raison de son faible coût économique et de sa capacité à limiter les risques. Toutefois, cette méthode doit être encadrée strictement afin que le rejet se fasse dans des conditions optimales. De plus, le lieu du rejet doit être choisi avec précaution en s'assurant d'effectuer le rejet en eau profonde et à un endroit ayant un courant assez fort pour assurer une vitesse de dispersion élevée ainsi que l'écart de température entre les rejets et le milieu récepteur dans le but de réduire les risques de création de zones de concentration en sels élevée. (Jones et al., 2019; ONU, 2017)

Quant à la présence de métaux lourds dans les rejets, peu de solutions économiquement viables sont proposées afin de minimiser leur présence dans les rejets. Jusqu'à temps qu'une technique rentable d'extraction des métaux lourds soit développée, la meilleure méthode de gestion est un encadrement strict concernant la teneur en métaux lourds maximale permise dans les rejets de saumure pourrait être une solution adéquate pour limiter leurs impacts sur l'environnement.

6.3.2 Gestion des enjeux économiques

Le coût relié à une unité d'eau dessalée est plus élevé que pour le coût d'une unité d'eau provenant d'une source conventionnelle. Le coût de l'eau dessalée est d'autant plus élevée lorsque l'installation est alimentée par une source d'énergie renouvelable. Toutefois, le développement des technologies avance rapidement ce qui augmente le rendement énergétique des différents procédés ainsi que le taux de récupération d'eau et qui diminue les coûts d'exploitation, dont les coûts relatifs à l'énergie renouvelable. (Mahmoudi et al., 2017)

Les études montrent que, généralement, les populations répondent positivement au coût de l'eau plus élevé puisque c'est malheureusement souvent la seule option pour répondre à leurs besoins en eau douce (Cotruvo et al., 2010). Cette méthode de gestion de la crise de l'eau reste difficilement réalisable dans les régions et les pays à faibles revenus, en raison de l'investissement initial que représente l'implantation d'une installation de dessalement. Si le dessalement de l'eau veut être considéré comme une solution viable

pour atteindre l'objectif 6 du Programme de développement durable des Nations Unies, la diminution constante du coût économique du dessalement de l'eau est nécessaire pour le déploiement tout comme la coopération internationale pour aider les régions dans le besoin à s'équiper en installations de dessalement. (Jones et al., 2019)

6.3.3 Gestion des enjeux sociaux

Le dessalement de l'eau salée a pour but principal d'augmenter la quantité d'eau douce disponible pour répondre à la demande, entre autres, dans le but de contribuer à l'atteinte de l'objectif 6 du Programme de développement durable des Nations Unies. L'importance de l'eau dans le développement durable a été mentionné à plusieurs reprises, notamment dans le chapitre deux. L'eau a en effet une incidence directe ou indirecte sur plusieurs aspects du développement durable. En assurant un accès à une source d'eau potable, la production d'eau dessalée a aussi des répercussions positives sur d'autres objectifs du Programme de développement durable des Nations Unies. Notamment, l'augmentation de la quantité d'eau douce disponible contribue à l'atteinte de l'objectif 2, soit « faim [zéro] » (ONU, s. d.b). La sécurité alimentaire est grandement dépendante de la disponibilité des ressources en eau douce (UNESCO, 2019a). Le dessalement de l'eau contribue aussi indirectement à l'atteinte des objectifs 1, 5, 8, 10 et 11, respectivement : « pas de pauvreté », « égalité entre les sexes », « travail décent et croissance économique », « inégalités réduites » et « villes et communautés durables ». (ONU, s. d.a)

Les sous-sections suivantes portent sur les enjeux sociaux entourant le dessalement de l'eau et les solutions pour les gérer durablement.

Santé de la population

L'OMS fournit des normes internationales à suivre concernant la qualité de l'eau douce ainsi que des recommandations quant à la saine gestion du dessalement de l'eau. Par contre, elle n'émet pas de normes de qualité pour l'eau potable qui prennent en considération les attributs spécifiques de l'eau dessalée. Peu de données sont disponibles sur la qualité de l'eau issue du dessalement et sur les effets réels de l'eau dessalée sur la santé des populations qui la consomme régulièrement. Des études approfondies sont nécessaires afin de s'assurer de ne pas créer des problèmes de santé évitables. Dans l'ensemble, il est possible de dénoter un manque d'encadrement légal à l'international quant à la qualité de l'eau issue du dessalement. (OMS, 2011; OMS, 2017) Toutefois, si la qualité de l'eau dessalée est adéquate, cette nouvelle source d'eau potable contribue positivement à assurer la santé de la population en leur offrant une source d'eau non contaminée.

Aussi, l'intégration d'un prétraitement et d'un post-traitement sans l'utilisation de produits chimiques réduit les risques par rapport à la santé de la population puisqu'il y a moins de risques qu'il y ait la création de sous-produits pouvant être nocifs pour la santé humaine à la suite du dessalement.

Exploitation des installations de dessalement par la population locale

L'arrivée d'une installation de dessalement dans un milieu apporte la création d'emplois pour cette région ce qui constitue un point positif. Toutefois, un enjeu entourant l'intégration d'une installation de dessalement est la capacité pour la population locale de l'exploiter. C'est-à-dire que l'installation de dessalement ne doit pas être trop complexe afin que la population locale soit en mesure d'acquérir les habiletés et les connaissances techniques nécessaires rapidement.

Acceptabilité sociale

L'acceptabilité sociale des technologies de dessalement est un enjeu dont l'intensité dépend principalement de la gestion des enjeux environnementaux et sociaux découlant des installations de dessalement. D'une part, l'intégration de normes de qualité entourant l'eau douce issue du dessalement aiderait à régir le goût, l'odeur et la couleur de l'eau ce qui diminuerait les préjugés face à l'eau dessalée. Aussi, les normes permettraient de rassurer les consommateurs quant à la qualité de l'eau ainsi qu'aux effets de l'eau sur leur santé. D'autre part, l'acceptabilité sociale face à la technologie sera plus facile si une gestion durable est faite des enjeux environnementaux découlant du dessalement de l'eau, principalement les enjeux reliés aux rejets de saumure et à l'utilisation de sources d'énergie non renouvelables. Aussi, le dessalement de l'eau devrait être utilisé en complémentarité à d'autres outils de gestion qui prône l'optimisation de l'utilisation des ressources en eau. (ONU, 2017; Speckhahn et Isgren, 2019)

7 RECOMMANDATIONS

À la suite de l'analyse de la pertinence du dessalement de l'eau comme outil d'adaptation potentiel face aux changements climatiques affectant les ressources en eau douce dans une perspective de développement durable, les constatations suivantes sont soulevées. En raison de leur polyvalence, les technologies de dessalement ont le potentiel de répondre en tout ou en partie à la demande en eau douce des populations considérées vulnérables dans le cadre de l'analyse en produisant une quantité d'eau douce supplémentaire. Cette source non conventionnelle d'eau douce a pour effet de réduire la pression que les changements climatiques exercent sur la santé et la sécurité des populations et d'augmenter leur résilience face aux variations dans la quantité d'eau disponible dans les réserves d'eau douce conventionnelles.

Aussi, l'utilisation de technologies de dessalement pour produire de l'eau douce contribue à l'adaptation aux changements climatiques, au respect du droit fondamental de l'homme à l'eau et à l'atteinte de l'objectif 6 du Programme de développement durable des Nations Unies à l'horizon 2030, soit de « garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement générés de façon durable » (ONU, 2015). En effet, ces technologies ont la capacité d'avoir un impact positif sur la crise de l'eau et parallèlement sur la majorité des objectifs de développement durable des Nations Unies. Toutefois, des améliorations quant à la gestion des enjeux entourant le dessalement de l'eau sont nécessaires afin d'assurer le caractère durable de cet outil et de limiter les répercussions négatives.

Tout d'abord, ce dernier chapitre offrira un aperçu des mesures pouvant être mises en place quant à la gestion des enjeux environnementaux, sociaux et économiques associés au dessalement de l'eau afin d'assurer la pérennité du caractère durable de cet outil. Puis, des pistes de solutions seront explorées quant aux mécanismes financiers internationaux applicables et à la collaboration internationale afin de se diriger vers l'intégration du dessalement de l'eau comme outil d'adaptation pour les populations vulnérables face aux changements climatiques affectant la crise de l'eau.

7.1 Recommandations quant à la gestion durable des enjeux

Plusieurs enjeux entourent le dessalement de l'eau. Le chapitre six a permis d'analyser le caractère durable de ces technologies comme outil d'adaptation dans l'optique où le but n'est pas de créer d'autres problématiques en tentant de s'adapter à un des effets des changements climatiques, soit la diminution de la quantité d'eau douce disponible. Il ressort de l'analyse que le dessalement de l'eau a des effets positifs sur plusieurs objectifs de développement durable des Nations Unies. De plus, les impacts négatifs associés au dessalement diminuent grandement lorsque les mesures nécessaires sont mises en place pour assurer la prise en charge des potentiels enjeux environnementaux, sociaux et économiques entourant la production d'eau douce par dessalement. Les sections suivantes proposent quelques recommandations pour assurer la gestion des risques environnementaux, sociaux et économiques entourant cet outil d'adaptation.

Gestion durable des risques environnementaux

- Élaborer un plan de gestion intégrée et transfrontalière des ressources en eau douce afin d'effectuer une gestion des écosystèmes d'eau douce qui assure une utilisation durable des ressources ainsi que l'incorporation de l'eau dessalée comme source d'eau complémentaire dans le but d'assurer le caractère renouvelable des sources d'eau douce conventionnelles, au besoin (Speckhahn et Isgren, 2019).
- Concevoir les installations de dessalement en fonction des besoins de la population, du type d'eau d'alimentation disponible et du type d'énergie renouvelable disponible selon les caractéristiques de la région afin d'optimiser l'efficacité du processus.
- Effectuer une étude des impacts environnementaux préalablement à la construction de l'installation de dessalement afin de minimiser les risques et de concevoir une installation en respect des limites du milieu, notamment quant à l'emplacement de la prise de l'eau d'alimentation et du mode de gestion des rejets de saumure.
- Élaborer un plan d'action pour la gestion des impacts environnementaux pour chaque installation de dessalement et assurer un suivi.
- Adopter un cadre législatif restrictif et prohibitif quant à l'exploitation d'une installation de dessalement.
- Investir en recherche et développement dans les technologies de dessalement pour améliorer le taux de récupération d'eau ainsi que dans des technologies de dessalement alimentées par une source d'énergie renouvelable afin de les rendre plus accessibles économiquement.
- Investir dans la recherche et le développement de méthodes de valorisation des rejets de saumure qui sont économiquement viables et respectueuses de l'environnement.
- Atténuer les changements climatiques en posant des actions pour réduire les émissions de GES afin de diminuer les impacts que les changements climatiques auront sur les ressources en eau douce et donc limiter le besoin d'avoir recours à des sources d'eau douce non-conventionnelles.

Gestion durable des risques sociaux

- Investir dans la recherche par rapport aux effets potentiels de l'eau dessalée sur la santé.
- Adopter une norme internationale quant à la qualité de l'eau potable produite par dessalement et encourager les pays à adopter une norme nationale au même effet.
- Éduquer la population sur les faits et les mythes entourant l'eau douce produite par dessalement afin de modifier leurs perceptions négatives.
- Utiliser l'eau dessalée comme source d'eau douce alternative en cas de catastrophe naturelle ayant un impact négatif sur le système d'alimentation en eau douce principal.
- Créer des emplois dans les installations de dessalement pour la population locale et leur offrir une formation lors de l'embauche pour encourager l'économie locale et l'intégration sociale.

Gestion durable des risques économiques

- Investir dans la recherche et le développement d'installations de dessalement à faible coût utilisant une source d'énergie renouvelable.
- Subventionner les installations de dessalement afin de réduire le coût de l'eau douce issue du dessalement et la rendre accessible à l'ensemble de la population.

7.2 Recommandations quant à l'implantation des technologies dans les pays vulnérables

Comme il a été établi lors de l'analyse, les populations vulnérables face aux effets des changements climatiques sur les ressources en eau douce sont situées dans des pays développés, des pays du BRISC et des pays en développement. La disparité entre le pouvoir économique des pays fait en sorte que les populations vivant dans un pays ou une région ayant un plus faible pouvoir économique, généralement les pays en développement, sont désavantagées quant à leurs options d'adaptations aux changements climatiques en raison du coût associé. (GIEC, 2014a; UNESCO, 2019) La présente section offre des pistes de solutions face aux actions à prendre pour réduire le déséquilibre face à la capacité d'un pays à s'adapter. Les recommandations principales quant à l'intégration du dessalement de l'eau comme outil d'adaptation dans les pays vulnérables sont les suivantes :

- Adopter un plan d'adaptation aux changements climatiques en intégrant le dessalement de l'eau comme source d'eau douce complémentaire dans le cadre d'une stratégie de gestion intégrée des ressources en eau douce afin d'optimiser l'utilisation de chaque unité d'eau douce (Speckhahn et Isgren, 2019).
- Promouvoir la collaboration entre les entités internationales ayant comme but commun de combattre la crise de l'eau et les partenaires nationaux publics et privés afin de :
 - Outiller les pays vulnérables avec un plan d'adaptation aux changements climatiques en intégrant le dessalement de l'eau comme source d'eau douce complémentaire, au besoin.
 - Éduquer la population internationale face aux enjeux entourant l'effet des changements climatiques sur la diminution des ressources en eau douce et des actions à poser pour limiter les impacts négatifs.
 - Concevoir des installations de dessalement polyvalentes qui prennent en considération et utilisent à leur avantage les besoins et les caractéristiques de la région pour laquelle l'installation est conçue.
 - Inciter la contribution des acteurs publics ou privés dans le financement des installations de dessalement dans les pays vulnérables.

- Investir une portion du budget des différentes entités internationales qui financent l'adaptation aux changements climatiques spécifiquement dans les projets d'installation de dessalement propulsée par des énergies renouvelables qui s'intègrent dans un plan d'adaptation, entre autres :
 - **Fonds vert pour le climat** : investir au moins 50 % des contributions des pays du Nord envers les pays Sud au Fonds vert pour le climat dans des mesures d'adaptation aux changements climatiques, dont des mesures d'adaptation relatives à la gestion des ressources en eau douce incluant les installations de dessalement de l'eau utilisant des sources d'énergies renouvelables dans les régions où un besoin en eau douce est présent ou prévisible.
 - **Fonds pour l'adaptation** : investir une partie du budget du Fonds pour l'Adaptation dans des projets d'adaptation aux changements climatiques qui affectent les ressources en eau douce, incluant des projets relatifs à des installations de dessalement utilisant des sources d'énergies renouvelables.
 - **Banque mondiale** : investir une partie du budget de la Banque mondiale pour l'adaptation aux changements climatiques dans des projets d'adaptation aux changements climatiques qui affectent les ressources en eau douce, incluant des projets relatifs à des installations de dessalement utilisant des sources d'énergies renouvelables.

CONCLUSION

Durant les dernières décennies, la pression sur les ressources en eau douce s'est amplifiée en raison de l'augmentation de la demande et de l'utilisation non durable des ressources. Aussi, les effets des changements climatiques sur le cycle de l'eau affectent les systèmes naturels. Les répercussions de ces pressions se traduisent par la raréfaction des ressources en eau douce et l'intensification de la crise de l'eau qui met en péril les avancées en matière de développement durable. Bien que l'atténuation des changements climatiques soit un objectif mondial, les actions menées par la communauté internationale pour réduire les émissions de GES ne semblent pas suffisantes pour limiter le réchauffement planétaire aux recommandations de l'Accord de Paris et ainsi limiter les impacts sur les écosystèmes. Notamment, les effets des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau douce se font déjà sentir dans certaines régions. Dans un monde où l'eau douce est essentielle à la vie, il est primordial de prévoir une solution d'adaptation. L'objectif de cet essai a donc été d'évaluer la solution du dessalement de l'eau comme outil potentiel d'adaptation aux changements climatiques affectant les ressources en eau douce destinées aux populations vulnérables, et ce, dans une perspective de développement durable.

En premier lieu, la problématique entourant les changements climatiques et la nécessité d'adaptation a été présentée en prenant soin d'introduire les concepts clés nécessaires à la compréhension globale de l'analyse. Puis, un portrait de l'eau comme élément essentiel au développement durable a été fait en introduisant le concept de la crise de l'eau. Ensuite, une présentation de l'incidence des changements climatiques sur les ressources en eau douce a mis l'accent sur l'impact du réchauffement planétaire sur le cycle de l'eau et des effets sur la demande, la disponibilité et l'accessibilité des ressources en eau douce. Il s'avère que le réchauffement planétaire a une incidence considérable sur les ressources en eau douce et contribue à accentuer le stress hydrique de plusieurs régions. Par la suite, les technologies de dessalement comme outil potentiel d'adaptation ont été présentées ainsi que les enjeux sociaux, économiques et environnementaux entourant leur utilisation et des pistes de solutions afin de gérer durablement ces enjeux. Il a été dénoté que les technologies de dessalement ont un grand potentiel pour diminuer le stress hydrique. Toutefois, les enjeux entourant leur utilisation ne sont pas négligeables. L'ensemble de ces sections ont mené à l'analyse de la pertinence du dessalement de l'eau comme outil d'adaptation pour répondre aux changements climatiques affectant les ressources en eau douce ainsi que de son caractère durable. Sont suivies des recommandations en fonction des conclusions tirées lors de l'analyse concernant la gestion durable des enjeux entourant le dessalement de l'eau et l'intégration des cet outil auprès des populations vulnérables. Principalement, il est primordial d'investir dans le développement de technologies de dessalement à faible impacts environnementaux et dans l'implantation de ce type d'installation dans les régions vulnérables.

Les technologies de dessalement présentent l'avantage d'augmenter la quantité d'eau douce disponible à partir d'une source infinie d'eau qui ne dépend pas des variés climatiques. La production d'eau douce par dessalement est une stratégie intéressante pour répondre à la demande grandissante en eau douce et

combattre la crise de l'eau qui est accentuée, entre autres, par les changements climatiques. Toutefois, cette méthode de gestion fait l'objet de plusieurs critiques en raison des risques qui y sont associés. Notamment, son déploiement à grande échelle comporte des risques environnementaux dont les impacts réels sont encore peu documentés. De plus, il pourrait inciter la population et les industries à ne pas adhérer aux principes d'utilisation durable des ressources en eau douce en raison de la facilité d'accès à des ressources en eau douce supplémentaires. Le dessalement de l'eau n'est qu'une solution parmi d'autres pour répondre à la crise de l'eau et travailler vers l'atteinte de l'objectif 6 du Programme de développement durable des Nations Unies. Il serait intéressant de comparer les technologies de dessalement à la technologie innovante, le *Janicki Omni Processor*, une installation autosuffisante produisant de l'eau potable et de l'électricité à partir des eaux usées qui permettrait de répondre aux deux volets du droit fondamental de l'homme à l'eau, soit l'eau potable et l'assainissement (Cashman, 2020).

RÉFÉRENCES

- Aamer, A., Tufa., R.A., Macedonio, F., Curcio, E., Drioli, E. (2018). Membrane technology in renewable-energy-driven desalination. *Renewable and sustainable energy reviews*, 18(1), 1-12.
- Ahmed, F.E., Hashaikeh, R. et Hilal, N. (2019). Solar powered desalination – Technology, energy and future outlook. *Desalination*, 453, 54-76.
- Al-Amshawee, S., Yunus, M.Y.B.M., Azoddein, A.A.M., Hassell, D.G., Dakhil, I.H. et Hasan, H.A. (2020)., Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review. *Chemical engineering journal*, 380.
- Aguilera, H. et Murillo-Dias, J.M., (2009). The effect of possible climate change on natural groundwater recharge based on a simple model: a study of four karstic aquifers in SE Spain. *Environmental Geology*, 57(5), 963-974. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/225793177_The_effect_of_possible_climate_change_on_natural_groundwater_recharge_based_on_a_simple_model_A_study_of_four_karstic_aquifers_in_SE_Spain
- Aznar-Sánchez, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., Velasco-Muñoz, J. F., & Valera, D. L. (2019). Aquifer Sustainability and the Use of Desalinated Seawater for Greenhouse Irrigation in the Campo de Níjar, Southeast Spain. *International journal of environmental research and public health*, 16(5), 898.
- Banque du Canada. (2020). Convertisseur de devises. Repéré à https://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/convertisseur-de-devises/?lookupPage=lookup_currency_converter_2017_fr.php&startRange=2010-01-20&rangeType=range&selectToFrom=to&convert=0%2C69&seriesFrom=Dollar+%28Canadien%29&seriesTo%5B%5D=FXUSDCAD&rangeValue=1.w&dFrom=&dTo=&submit_button=Convert
- Banque Mondiale (WBG). (2019a). Repéré à <https://www.banquemondiale.org/fr/topic/climatechange/overview#1>
- Banque mondiale (WBG). (2019b). *The role of desalination in an increasingly water-scarce world*. Repéré à <http://documents.worldbank.org/curated/en/476041552622967264/pdf/135312-WP-PUBLIC-14-3-2019-12-3-35-W.pdf>
- Banque mondiale (WBG). (2019c). *The world bank group action plan on climate change adaptation and resilience: Managing risks for a more resilient future*. Repéré à <http://documents.worldbank.org/curated/en/519821547481031999/The-World-Bank-Groups-Action-Plan-on-Climate-Change-Adaptation-and-Resilience-Managing-Risks-for-a-More-Resilient-Future.pdf>
- Ben Sik Ali, M., Mnif, A., Hamrouni, B. et Dhahbi, M. (2010). Electrodialytic desalination of brackish water: Effect of process parameters and water characteristics. *Ionics*, 16(7), 621-629.
- Borsani, R. et Rebagliati, S. (2005), Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies, *Desalination* 182, 29-37.
- Cashman, K. (2020). The omni processor: Turning sewage into drinking water in senegal (and beyond?). Repéré à <https://en.reset.org/blog/omni-processor-turning-sewage-drinking-water-senegal-and-beyond-01112020>
- Causserand, C., Albasi, C. et Roux de Balman, H. (2017). Filtration membranaire (OI, NF, UF) application en traitement des eaux. Repéré à <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.usherbrooke.ca/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/operations-unitaires-techniques-separatives-sur-membranes-42331210/filtration-membranaire-oi-nf-uf-mf-j2794/#?>
- Centre d'Information sur l'Eau. (s. d.). Quelles sont les ressources en eau dans le Monde?. Repéré à <https://www.cieau.com/connaitre-leau/ou-en-sont-les-ressources-en-eau-dans-le-monde/>

- Chen, T., Wang, Q., Qin, Y., Chen, X., Yang, X., Lou, W., Zhou, M., He, G. et Lu, K. (2015). Knowledge, attitudes and practice of desalinated water among professionals in health and water departments in Shengsi, China: A qualitative study. *PLoS One* 10 (4). Repéré à https://www.researchgate.net/publication/275238546_Knowledge_Attitudes_and_Practice_of_Desalinated_Water_among_Professionals_in_Health_and_Water_Departments_in_Shengsi_China_A_Qualitative_Study
- Clemenceau, B. (2018). Où en est le droit des êtres humains à l'eau et à l'assainissement depuis l'adoption de la résolution n° 64/292 de l'Assemblée générale des Nations Unies du 28 juillet 2010 ?, *La Revue des droits de l'homme*, 13. Repéré à <http://journals.openedition.org/revdh/3651>
- Climate Adapt. (s. d.). EU Adaptation Strategy. Repéré à : <https://climate-adapt.eea.europa.eu/eu-adaptation-policy/strategy>
- Coalition eau. (2014). *Eau et changement climatique*. Repéré à <http://www.coalition-eau.org/wp-content/uploads/Etude-Eau-et-Climat-Coalition-Eau1.pdf>
- Conseil économique et social des Nations Unies. (2019). *Rapport du Secrétaire général - édition spéciale : point sur les objectifs de développement durable*. Repéré à <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2019/secretary-general-sdg-report-2019--FR.pdf>
- Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC). (2015). L'Accord de Paris. Repéré à <https://unfccc.int/fr/process-and-meetings/the-paris-agreement/l-accord-de-paris>
- Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC). (2019). The Katowice RuleBook – main principles of the document. Repéré à : <https://cop24.gov.pl/news/news-details/news/the-katowice-rulebook-main-principles-of-the-document/>
- Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC). (2020a). Adaptation Fund. Repéré à : <https://unfccc.int/process/bodies/funds-and-financial-entities/adaptation-fund>
- Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC). (2020b). What do adaption to climate change and climate resilience mean. Repéré à : <https://unfccc.int/fr/node/15876#eq-3>
- Costanza, R., Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., Farber, S. et Turner, R. K. (2014). Changes in the Global Value of Ecosystem Services. *Global Environmental Change*, 26, 152–58.
- Cotruvo, J., Voutchkov, N., Fawell, J., Payment, P., Cunliffe, D. et Lattemann, S. (2010). *Desalination: Technology, health and environment – extrait*. Repéré à <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C07/E6-144-51-00.pdf>
- Duan, L., Zhang, CH., Gu, W., Zhi, H., Kong, J., Zhang, SP., Li, YM., Lu, K. (2019). Sub-Chronic Toxicity of Defoamer Used in Seawater Desalination. *Biomed Environ Sci.* 32(5), 334-344. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31217050>
- Ejaz Ahmeda, F., Raed, H., Ali, D. et Nidal, H. (2019) Mathematical and optimization modelling in desalination: State-of-the-art and future direction. *Desalination* 469.
- Elimelech, M., et Phillip, W. A.. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science* 333, 712-717.
- Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF). (2015a). *Il est temps d'agir : résumé*. Repéré à https://www.unicef.org/publications/files/EUnless_we_act_now_Executive_summary_French.pdf
- Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF). (2015b). *Unless we act now: The impact of climate change on children*. Repéré à : https://www.unicef.org/media/50391/file/Unless_we_act_now_The_impact_of_climate_change_on_children-ENG.pdf

- Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF). (2017). *Soif d'avenir : l'eau et les enfants face aux changements climatiques – Résumé Analytique*. Repéré à https://www.unicef.org/publications/files/UNICEF_Thirsting_for_a_Future_Executive_Summary_FR.pdf
- Forum économique mondial (WEF). (2019). *The global risks report 2019: 14th edition*. Repéré à http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2019.pdf
- Frank, H., Rahav, E. et Bar-Zeev, E., (2017). Short-term effects of SWRO desalination brine on benthic heterotrophic microbial communities. *Desalination* 417, 52–59.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T. et Melin, T. (2007), State-of-the-art of reverse osmosis desalination, *Desalination* 216, 1-76.
- Gaid, K. et Treal, Y. (2006). Le dessalement des eaux par osmose inverse: l'expérience de Véolia Water. *Desalination* 203, 1-14.
- Giwa, A., Dufour, V., Al Marzooqi, F., Al Kaabi, M. et Hasan, S.W. (2017). Brine management methods: recent innovations and current status. *Desalination* 407, 1–23.
- Gouvernement du Canada (2009). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique – les matières dissoutes totales. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/recommandations-pour-qualite-eau-potable-canada-document-technique-matieres-dissoutes-totales-mdt.html>
- Gouvernement du Canada. (2013). Notions élémentaires sur l'eau : le cycle de l'eau. Repéré à : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/notions-elementaires/cycle-hydrologique.html>
- Gouvernement du Canada. (2016). L'Accord de Paris. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/accord-paris.html>
- Gouvernement du Québec. (2015). *Rapport sur le coût et les sources de revenu des services d'eau*. Repéré à https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/grands_dossiers/strategie_eau/rapport_cout_et%20sources_revenus_services_eau.pdf
- Green Climate Fund. (s.d.). Repéré à <https://www.greenclimate.fund/who-we-are/about-the-fund>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2013). *Climate Change 2013 : The physical science basis*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2014a). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2014b). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and vulnerability: Part A – Global and sectoral aspects*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2014c). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and vulnerability: Part B – Regional aspects*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartB_FINAL.pdf

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2018). *Global Warming of 1.5 °C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2019). *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: A special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf
- Gude, V.G. (2017). Desalination and water reuse to address global water scarcity. *Environ. Sci. Biotechnol.* 16 (4), 591–609. Repéré à <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11157-017-9449-7>
- Horton, R., Rosenzweig, C., Ramaswamy, V., Kinney, P., Mathur, R., Pleim, J. et Brahmananda Rao, V. (2010). *Integrated Climate Change Information for Resilient Adaptation Planning*. Repéré à <http://pubs.awma.org/gsearch/em/2010/11/horton.pdf>
- Ibáñez, R., Pérez-González, A., Gómez, P., Urtiaga, A.M. et Ortiz, I. (2013). Acid and base recovery from softened reverse osmosis (RO) brines. *Desalination* 309. 165-170. Repéré à <https://grupos.unican.es/ips/Publicaciones/2013/1.%20Iba%C3%B1ez.pdf>
- Internal Displacement Monitoring Centre. (2018). *Global Report on Internal Displacement*. <http://www.internal-displacement.org/global-report/grid2018/downloads/2018-GRID.pdf>
- International Center for Biosaline Agriculture (ICBA). (2018). Scientists manage to increase fish biomass by 300% using reject brine. Repéré à <https://www.biosaline.org/news/2018-06-07-6506>,
- International Desalination Association (IDA). (2019). Connecting People and Ideas to Water Solutions. Repéré à <https://idadesal.org/>
- Jones, E., Qadir, M., Van Vliet, M., Smakhtin, V. et Kang, Seong-mu. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356.
- Jones, E. et Van Vliet, M.T.H. (2018). Drought impacts on river salinity in the southern US: Implications for water scarcity. *Sci. Total Environ.* 644, 844–853.
- Kaplan, R., Mamrosh, D., Salih, H.H. et Dastgheib, S.A. (2017). Assessment of desalination technologies for treatment of a highly saline brine from a potential CO2 storage site. *Desalination* 404, 87–101. Repéré à <https://www.osti.gov/servlets/purl/1332082>
- Kurihara, M. et Takeuchi, H. (2018). SEWO-PRO system in Mega-ton Water System for energy reduction and low environmental impact. *Water*, 10 (1), 48. Repéré à <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/1/48/htm>
- Kurihara, M., Takeuchi, H. et Ito, Y. (2018). A reliable seawater desalination system based on membrane technology and biotechnology considering reduction of the environmental impact. *Environments*, 5 (12), 127.
- Ladewig, B. et Asquith, B. (2012). *Desalination Concentrate Management* (1^e éd.). Repéré à <https://www.springer.com/series/10045>
- Loganathan, P., Naidu, G. et Vigneswaran, S. (2017). Mining valuable minerals from seawater: A critical review. *Environmental Science: Water Research and Technology*. 3 (1), 37–53. Repéré à <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/ew/c6ew00268d#!divAbstract>

- Luo, T., Young, R. et Reig, P. (2015). *Aqueduct projected water stress country rankings*. Repéré à <https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/aqueduct-water-stress-country-rankings-technical-note.pdf>
- Mahmoudi, H., Ghaffour, N., Goosen, M. et Bundschuh, J. (2017). *Renewable energy technologies for water desalination*. Repéré à <https://ebookcentral.proquest.com/lib/usherbrookemgh-ebooks/detail.action?docID=4890683>
- Martinez-Alvarez, V., Martin-Gorriz, B. et Soto-Garcia, M. (2016). Seawater desalination for crop irrigation – A review of current experiences and revealed key issues. *Desalination*, 381, 58-70.
- Morillo, J., Usero, J., Rosado, D., El Bakouri, H., Rianza, A. et Bernalola, F.J. (2014). Comparative study of brine management technologies for desalination plants. *Desalination* 336, 32–49.
- Nordhaus, W. D. (2013). *The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world*. New Haven, Connecticut : Yale University Press.
- Olivier, M. J. (2017). *Chimie de l'environnement : hydrosphère, atmosphère, lithosphère, technosphère*. (2^e éd.). Longueuil, Québec, Canada : Lab Éditions.
- Omar, A. et Khaldi, A. (2017). Dessalement de l'eau de mer et impacts environnementaux : cas de la station d'El-Mactaâ. *Journal of water and environmental sciences*, 1, 249-253.
- Oneka. (2019). Repéré à <https://www.onekawater.com/fr/>
- Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). (2017), *Investing in Climate, Investing in Growth*. Repéré à <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264273528-en.pdf?expires=1578594164&id=id&accname=guest&checksum=4A15ABAA18C273A054E3517A9D1C1463>
- Organisation des Nations Unies (ONU). (s. d.a) Objectifs de développement durable. Repéré à <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/>
- Organisation des Nations Unies (ONU). (s. d.b) Objectifs de développement durable : décennie de l'eau. Repéré à <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/water-action-decade/>
- Organisation des Nations Unies (ONU). (2015). *Accord de Paris*. Repéré à https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf
- Organisation des Nations Unies (ONU). (2016). *Assemblée générale*. Repéré à https://digitallibrary.un.org/record/849767/files/A_C-2_71_L-12_Rev-1-FR.pdf
- Organisation des Nations Unies (ONU). (2017). *Lignes directrices actualisées sur le dessalement*. Repéré à http://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/17335/17wg435_3_fre.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Organisation des Nations Unies (ONU). (2018). *United Nations Secretary-General's plan: Water action decade 2018-2018*. Repéré à https://wateractiondecade.org/wp-content/uploads/2018/03/UN-SG-Action-Plan_Water-Action-Decade-web.pdf
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). (2014). *Stress hydrique*. Repéré à http://www.fao.org/NR/WATER/AQUASTAT/infographics/Stress_fra.pdf
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). (2015). *AQUASTAT – Système d'information mondiale de la FAO sur l'eau et l'agriculture*. Repéré à <http://www.fao.org/aquastat/fr/overview/methodology/water-use>

- Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). (2018a). *Eau propre et assainissement : progrès relatifs aux niveaux de stress hydrique*. Repéré à http://www.unwater.org/app/uploads/2018/12/SDG6_Indicator_Report_642_Progress-on-Level-of-Water-Stress_2018_FRENCH.pdf
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. (FAO). (2018b). *L'avenir de l'alimentation et de l'agriculture : parcours alternatifs d'ici à 2050*. Repéré à <http://www.fao.org/3/CA1553FR/ca1553fr.pdf>
- Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). (2012). *Managing water under uncertainty and risk: The United Nations World Water Development report 4, volume 1*. Repéré à <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/WWDR4%20Volume%201-Managing%20Water%20under%20Uncertainty%20and%20Risk.pdf>
- Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). (2019a). *Le Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2019 : ne laisser personne pour compte*. Repéré à <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367305>
- Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). (2019b). *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2019 : ne laisser personne pour compte, faits et chiffres*. Repéré à https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367276_fre
- Organisation mondiale de la santé (OMS). (2011). Safe drinking-water from desalination. Repéré à https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/desalination_guidance_en.pdf
- Organisation mondiale de la santé (OMS). (2017). *Directives de qualité pour l'eau de boisson : quatrième édition*. Repéré à <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/258887/9789242549959-fre.pdf?sequence=1>
- Organisation mondiale de la santé (OMS). (2019). Changement climatique et santé humaine : eau et santé. Repéré à <https://www.who.int/globalchange/ecosystems/water/fr/>
- Oxfam. (2018). *Climate finance shadow report 2018*. Repéré à https://www-cdn.oxfam.org/s3fs-public/file_attachments/bp-climate-finance-shadow-report-030518-en.pdf
- Palomar, P. et Losada, I.J. (2011). *Impacts of brine discharge on the marine environment: Modelling as a Predictive Tool*. Repéré à <http://cdn.intechweb.org/pdfs/13763.pdf>
- Qadir, M., Noble, A.D., Karajeh, F. et George, B. (2015). *Resource Recovery and Reuse Series 5: Potential business opportunities from saline water and salt-affected land resources*. Repéré à http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/wle/rrr/resource_recovery_and_reuse-series_5.pdf
- Qadir, M., Jiménez, G.C., Farnum, R.L., Dodson, L.L. et Smakhtin, V. (2018). Fog water collection: Challenges beyond technology. *Water* 10 (4), 372. Repéré à <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/4/372/htm>
- Richter, B.D., Abell, D., Bacha, E., Brauman, K., Calos, S., Cohn, A., Disla, C., Friedlander O'Brien, S., Hodges, D., Kaiser, S., Loughran, M., Mestre, C., Reardon, M. et Siegfried, E., (2013). Tapped out: How can cities secure their water future?. *Water Policy* 15(3), 335–363.
- Ritchie, H. et Roser, M. (2018). Water Use and Stress. Repéré à <https://ourworldindata.org/water-use-stress#>
- Roberts, D.A., Johnston, E.L. et Knott, N.A., 2010. Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: a critical review of published studies. *Water Res.* 44(18), 5117–5128.
- Robinson, M. et Ward, R.C. (2000). *Principles of Hydrology* (4^e éd.). Berkshire, England : McGraw Hill.
- Rover, J-M. (2017, février). Eau de mer et eau potable. *Techniques de l'ingénieur*.

- Sánchez, A.S., Nogueira, I.B.R. et Kalid, R.A. (2015). Uses of the reject brine from inland desalination for fish farming, Spirulina cultivation, and irrigation of forage shrub and crops. *Desalination* 364, 96–107. Repéré à https://www.researchgate.net/profile/As_Sanchez/publication/274382682_Final_version_-_AS_Sanchez_-_Desalination/links/551d7eee0cf213ef063e5fd7/Final-version-AS-Sanchez-Desalination.pdf?origin=publication_list
- Speckhahn, S. et Isgren, E. (2019). The irresistible solution: rationale and risks of extending water limits through desalination in the case of Gotland, Sweden. *Journal of political ecology*, 26, 128-149. Repéré à <https://journals.uair.arizona.edu/index.php/JPE/article/download/22984/21934>
- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Repéré à [https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=U-VmlrGGZgAC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Stern,+N.+\(2007\).+The+Economics+of+Climate+Change:+The+Stern+Review.+Cambridge,+Angleterre:+Cambridge+University+Press.&ots=9et05virse&sig=VZXkqCkHtJzcegXchR8RlvMTi4g#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=U-VmlrGGZgAC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Stern,+N.+(2007).+The+Economics+of+Climate+Change:+The+Stern+Review.+Cambridge,+Angleterre:+Cambridge+University+Press.&ots=9et05virse&sig=VZXkqCkHtJzcegXchR8RlvMTi4g#v=onepage&q&f=false)
- Tong, T. et Elimelech, M., (2016). The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies and future directions. *Environnement, sciences and technologies*. 50(13), 6846-6855. Repéré à <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.6b01000#>
- United States Geological Survey (USGS). (s. d.a). Repéré à: <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school>
- United States Geological Survey (USGS). (s. d.b). Desalination. Repéré à https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/desalination?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- Safe drinking water foundation (SDWF). (2017). TDS et PH. Repéré à <https://www.safewater.org/french-fact-sheets/2017/2/9/tds-ph>
- Voutchkow, N., Kaiser, G., Stover, R., Lienhart, J. et Awerbuch. (2019). *Sustainable management of desalination plant concentrate – Desalination industry position paper – Energy and environment committee of the international desalination association (IDA)*. Repéré à <https://idadesal.org/wp-content/uploads/2019/10/EEC-White-Paper-10-13.pdf>
- Wada, Y., Reager, J.T., Chao, B.F., Wang, J., Lo, M.H., Song, C., Li, Y. et Gardner, A.S. (2017). Recent changes in land water storage and its contribution to sea level variations. *Surveys in geophysics*, 38, 131-152.
- Wakil Shahzad, M., Burban, M., Ybyraiymkul, D., et Choon Ng, K. (2019). Desalination processes efficiency and future roadmap. *Entropy*, 21(84).
- Wenten, I.G., Ariono, D., Purwasasmita, M. et Khoirudin. (2017). Integrated processes for desalination and salt production: A mini-review. *AIP Conference Proceedings*. 1818(1). Repéré à <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4976929?class=pdf>
- Wenten, I.G., Khoiruddin, K., Aryanti, P.T.P. et Hakim, A.N. (2016). Scale-up Strategies for Membrane-Based Desalination Processes: A Review. *Journal of Membrane Science and Research*. 2(2), 42–58. Repéré à https://pdfs.semanticscholar.org/26ed/e22c9ceb773a46ff054694d401866abc6e6d.pdf?_ga=2.21743987.994198276.1578610468-649497275.1578610468
- Xu, P., Cath, T.Y., Robertson, A.P., Reinhard, M., Leckie, J.O. et Drewes, J.E. (2013). Critical review of desalination concentrates management, treatment and beneficial use. *Environ. Eng. Sci.* 30(8), 502–514. Repéré à <https://pdfs.semanticscholar.org/6c05/07007abc534fc4b9895cd06b3ccb0ecad812.pdf>
- Yaqub, M. et Lee, W. (2019). Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater : A review. *Science of the total environment*, 681, 551-563.

ANNEXE 1 – SCHÉMA DE L'INJECTION EN Puits PROFONDS

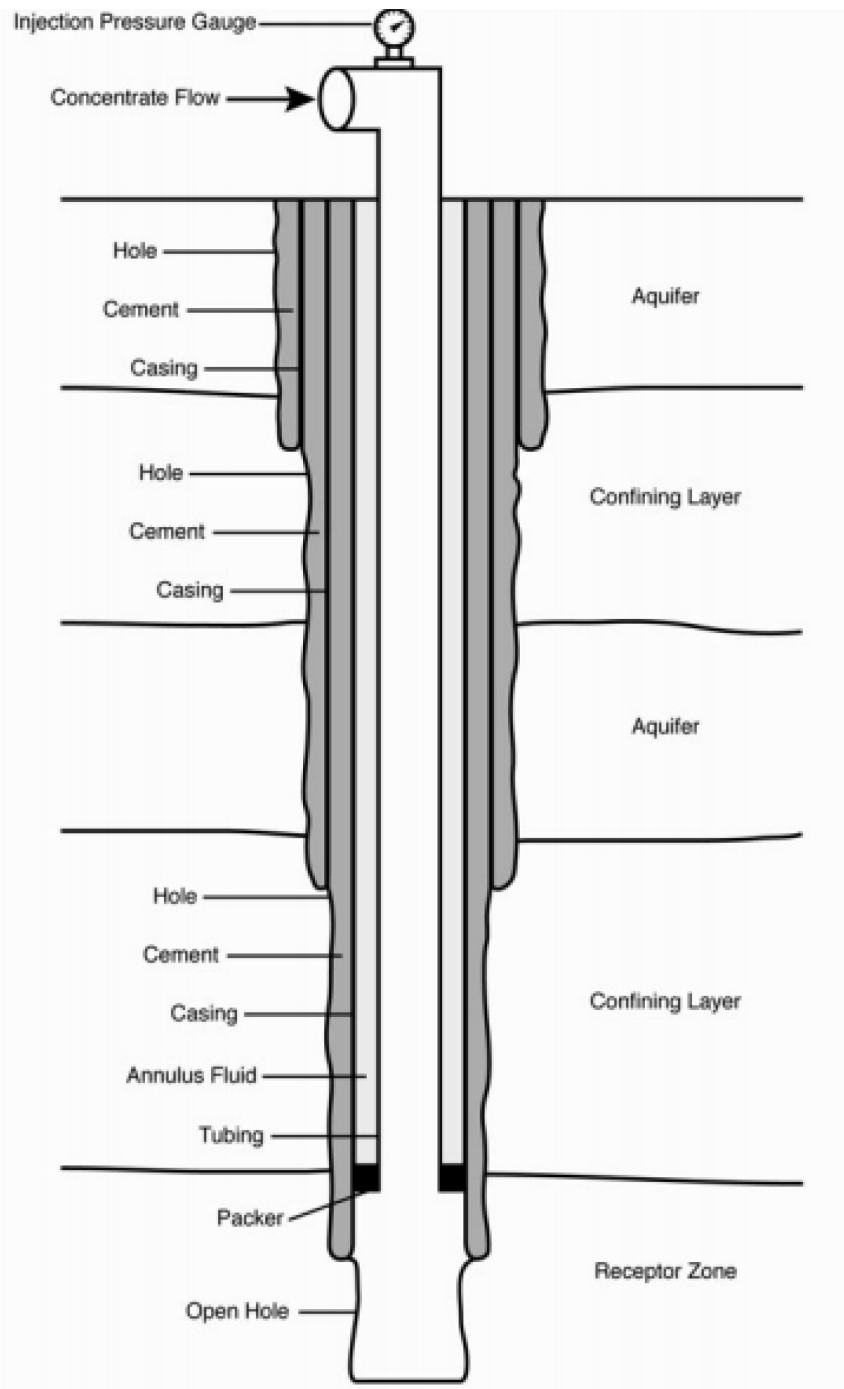


Figure A1 Schéma de la méthode de gestion des rejets de saumure par injection en puits profonds
(tiré de : Ladewig et al., 2012).

ANNEXE 2 – PROGRAMME DE DÉVELOPPEMENT DURABLE DES NATIONS UNIES



Figure A2 17 objectifs du Programme de développement durable des Nations Unies à l'horizon 2030
(inspiré de : ONU, s. d.a).